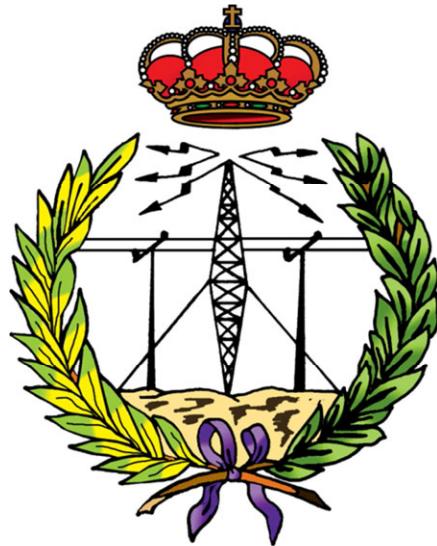


# **ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**APLICACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN LOS  
SISTEMAS DE ALUMBRADO**

Para acceder al título de:

**Ingeniero técnico de telecomunicación especializado en  
sistemas de telecomunicación**

Autor: Navin Mahtani Bhagwandas

Septiembre - 2013

# PROYECTO FIN DE CARRERA

## Tema

Red Sensorial y Energías Renovables

## Título

Aplicación de nuevas tecnologías en los sistemas de alumbrado

## Autor

Navin Mahtani Bhagwandas

## Titulación

Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones. Especialidad en Sistemas de Telecomunicación

## Tutor

Rafael Herradón Díez

## Departamento

DIAC

## Presidente Tribunal

Juan Ignacio Godino Llorente

## Vocal

Rafael Herradón Díez

## Vocal Secretario

Florentino Jiménez Muñoz

## Fecha de lectura

30 de septiembre de 2013

## RESUMEN

A medida que transcurre el tiempo la sociedad evoluciona, las ciudades crecen, se modernizan, mejoran su infraestructura y se ofrecen más y mejores servicios a sus ciudadanos. Esto ha hecho que durante muchos años las ciudades se hayan desarrollado sin pensar en lo que vendrá más adelante, contaminando el medio ambiente y consumiendo mucha energía y de forma ineficiente. Ante esta situación, y gracias a las innovaciones tecnológicas en materia de comunicaciones, se están adoptando medidas para dirigir la evolución de las ciudades hacia un modelo de ciudad inteligente y sostenible.

Las redes de comunicaciones constituyen uno de los pilares sobre los que se asienta la sociedad, que se encuentra siempre en contacto con su entorno. Cada vez más, se tiene una mayor necesidad de conocer lo que ocurre en el entorno en tiempo real solicitando información climatológica en una determinada ubicación, permitiendo conocer el estado del tráfico para elegir la ruta hacia el trabajo, saber el tiempo que tardará el autobús en llegar a la parada, etc. Como éstos, se podrían citar muchos más ejemplos de necesidades y servicios que demandan hoy día la sociedad y que, seguramente, nadie pensaba que las iba a necesitar hace unos años.

Muchos de estos servicios en tiempo real se consiguen gracias a las redes de sensores inalámbricas. Consiste en desplegar una serie de diminutos sensores en una zona determinada con el objetivo de recoger la información del medio, procesarla y modelarla para que esté disponible para los usuarios. Observando la tendencia seguida por las Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones (TIC) se puede constatar una continua evolución hacia los dispositivos embebidos, de cada vez más pequeño tamaño y menor consumo y, al mismo tiempo, con mayor capacidad de proceso y memoria y facilidad para las comunicaciones.

Siguiendo esta línea, se está construyendo la ciudad inteligente con capacidad para pensar y tomar decisiones, pero hay que dotarla de cierto grado de eficiencia. Se trata de aprovechar los recursos de la naturaleza para crear fuentes de energías limpias e ilimitadas. Empleando las tecnologías oportunas para transformar, por ejemplo, la energía del Sol o la energía del viento en electricidad, se puede alcanzar el modelo de ciudad que se pretende.

## **ABSTRACT**

As time passes society evolves, cities grow, modernize, improve their infrastructure and offer more and better services to their citizens. This has made for many years cities have developed without thinking about what will come later , polluting the environment and high energy consuming and inefficient . Given this situation, and thanks to the Technological innovations in communications, is being taken to direct the evolution of cities towards a smart city model sustainable. Communication networks are one of the pillars on which society rests , which is always in contact with their environment. Increasingly, there is a greater need to know what happens in the real-time environment requesting weather information in a certain location , allowing know the traffic to choose the route to work , namely the time take the bus to get to the bus stop, etc. . As these, you could cite many more Examples of needs and services that society demands today and, surely, no one thought that was going to need a few years ago.

Many of these real-time services are achieved through networks wireless sensors. Is to deploy a series of sensors in a tiny given area in order to collect information from the environment, process and shape it to make it available to users. Observing the trend followed by the Information Technology and Communications (ICT ) can finding an evolving toward embeded devices of increasingly small size and lower power consumption and at the same time, higher capacity process and memory ease communications.

Following this line, is under construction with capacity smart city to think and make decisions, but you have to give it some degree of efficiency. It seeks to harness the resources of nature to create clean energy sources and unlimited. Using appropriate technologies to transform, for example, energy from the sun or wind energy into electricity, it can achieve the model city intended.



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
1.1. Objetivos .....	7
1.2. Contenidos .....	8
<b>2. ALUMBRADO PÚBLICO .....</b>	<b>10</b>
2.1. Definición .....	10
2.2. State of the Art .....	11
2.2.1. Orígenes .....	11
2.2.2. Evolución .....	12
2.2.3. Situación actual .....	20
2.3. Smart City .....	22
2.3.1. Implantación tecnológica de una <i>Smart City</i> .....	24
2.3.2. Casos de éxito de una <i>Smart City</i> .....	26
<b>3. ENERGÍAS RENOVABLES.....</b>	<b>30</b>
3.1. Historia y Evolución de la Energía Solar Fotovoltaica .....	31
3.1.1. Situación actual y futura de la Energía Solar Fotovoltaica .....	33
3.2. Efecto Fotovoltaico. La Célula Fotovoltaica .....	35
3.3. Sistemas Fotovoltaicos .....	38
3.3.1. Sistemas conectados a la red .....	39
3.3.2. Sistemas autónomos o aislados de la red .....	40
3.3.3. Componentes de las Instalaciones Fotovoltaicas .....	41
<b>4. TECNOLOGÍA DE COMUNICACIONES Y RED DE SENSORES INALÁMBRICA.....</b>	<b>52</b>
4.1. Sensores .....	52
4.2. Caracterización de las WSN.....	53
4.3. Elementos de una WSN .....	54
4.3.1. Nodos sensores y actuadores .....	55
4.4. Arquitectura de una WSN .....	58
4.4.1. Centralizada .....	58
4.4.2. Distribuida .....	58
4.5. Topología de una WSN .....	59
4.5.1. En estrella.....	59
4.5.2. De igual a igual .....	59
4.6. Tipos de tecnologías inalámbricas .....	60
4.6.1. Bluetooth .....	60
4.6.2. WI-FI .....	61
4.6.3. Ultra-Wide Band .....	62
4.6.4. Z-Wave .....	62



4.6.5. Wibree – Bluetooth Ultra Low Energy .....	62
4.6.6. IEEE 802.15.4.....	63
4.6.7. ZigBee.....	65
4.6.8. Comparativas entre tecnologías de redes inalámbricas .....	66
<b>4.7. Protocolos para el enrutamiento de una WSN.....</b>	<b>68</b>
4.7.1. Modelos de enrutamiento .....	68
<b>5. APLICACIONES EN EL SISTEMA DE ALUMBRADO. DISEÑO DEL SISTEMA .....</b>	<b>70</b>
<b>5.1. Introducción .....</b>	<b>70</b>
<b>5.2. Descripción del sistema .....</b>	<b>70</b>
<b>5.3. Solución propuesta.....</b>	<b>72</b>
5.3.1. Sistema de iluminación .....	74
5.3.2. Sistema de red sensorial .....	83
5.3.3. Modelo esquemático del sistema .....	95
<b>5.4. Estado del mercado .....</b>	<b>96</b>
5.4.1. Sistema fotovoltaico solar.....	97
5.4.2. Iluminación LED.....	98
5.4.3. Red sensorial.....	98
<b>5.5. Estudio económico .....</b>	<b>103</b>
5.5.1. Presupuesto .....	103
5.5.2. Análisis de ahorro .....	104
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>106</b>
<b>6.1. Líneas futuras .....</b>	<b>107</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>108</b>



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Ejemplo de alumbrado público.....	10
Figura 2 – Farolero en la tarea de encendido.....	11
Figura 3 – Lámpara de Vapor de Mercurio a Alta Presión.....	14
Figura 4 – Lámpara de vapor de mercurio con halogenuros metálicos .....	14
Figura 5 – Sensibilidad cromática del ojo humano.....	15
Figura 6 – Lámpara de vapor de sodio a baja presión.....	16
Figura 7 – Lámpara de vapor de sodio a alta presión.....	17
Figura 8 – Lámpara de inducción magnética.....	18
Figura 9 – Gasto en alumbrado público por habitante y año.....	20
Figura 10 – Sectores convergentes en una Smart City .....	24
Figura 11 – Edmund Becquerel. Descubridor del Efecto Fotovoltaico .....	31
Figura 12 – Evolución de la capacidad FV instalada en el mundo .....	33
Figura 13 – Porcentaje de las instalaciones FV por países .....	33
Figura 14 – Semiconductor tipo n. La conducción se produce por la liberación de electrones y su salto a la banda energética de conducción por efecto de la incidencia de la radiación solar .....	36
Figura 15 – Semiconductor tipo p. La conducción se produce por el desplazamiento de los electrones de hueco en hueco .....	36
Figura 16 – Funcionamiento de una célula fotovoltaica. Recorrido de los electrones, si se cierra exteriormente el circuito eléctrico, al incidir la luz en la cara n.....	37
Figura 17 – Esquema básico de una instalación de conexión a la red.....	39
Figura 18 – Esquema básico de una instalación autónoma.....	40
Figura 19 – Componentes de un módulo fotovoltaico.....	41
Figura 20 – Curva I-V de funcionamiento un módulo fotovoltaico. Se observan los efectos de la variación de la temperatura y de la radiación incidente .....	42
Figura 21 – Tipos de módulos en función de células fotovoltaicas. Monocristalino, policristalino y silicio amorfo respectivamente .....	44
Figura 22 – Ejemplo de acumulador ciclo profundo comercial para aplicaciones fotovoltaicas.....	46
Figura 23 – Variación de la tensión con el tiempo según el régimen de descarga y tipo de batería .....	47
Figura 24 – Regulador de carga de baterías .....	49
Figura 25 – Ejemplo de inversores comúnmente empleados .....	50
Figura 26 – Estructura soporte para una central FV.....	51
Figura 27 – Modelo de estructura soporte para una columna o báculo .....	51
Figura 28 – Elementos de una WSN .....	55
Figura 29 – Arquitectura de un nodo sensor.....	56
Figura 30 – Estructura interna de un sensor inalámbrico .....	57
Figura 31 – Arquitectura centralizada en una WSN .....	58
Figura 32 – Arquitectura distribuida en una WSN.....	58
Figura 33 – Topología en estrella .....	59
Figura 34 – Topología de igual a igual .....	60
Figura 35 – Arquitectura IEEE 802.15.4 con modelo OSI.....	64
Figura 36 – Capacidades y rango de transmisión por tecnologías .....	67
Figura 37 – Situación del C.C. Parla Natura .....	71
Figura 38 – C.C Parla Natura.....	72
Figura 39 – Situación del C.C Parla Natura .....	74
Figura 40 – Datos de la luminaria .....	75
Figura 41 – Nivel de iluminación calculados a una altura de 5 metros .....	75





Figura 42 – Sistema solar fotovoltaico que se incorporará a la farola .....	76
Figura 43 – Farola fotovoltaica con dos módulos.....	82
Figura 44 – Farola fotovoltaica con dos módulos.....	83
Figura 45 – Tipos de sensores magnéticos .....	84
Figura 46 – Placa Arduino empleado por muchas plataformas de desarrollo de sensores y dispositivos wireless y sus características .....	84
Figura 47 – Ubicación de cada nodo sensor .....	85
Figura 48 – Estados del nodo sensor .....	85
Figura 49 – Batería de litio de 26Ah. El modelo que se propone asocia dos de estas baterías para aumentar su capacidad al doble.....	86
Figura 50 – Características del módulo Xbee para la comunicación radio con alcances exteriores superiores a 120 metros.....	87
Figura 51 – Características del módulo Xbee ZB para la comunicación radio .....	89
Figura 52 – Distinción de los componentes en la red.....	89
Figura 53 – Esquema de nodos centrales .....	90
Figura 54 – Sensor de luminosidad LDR .....	90
Figura 55 – Modo de actuación de la luminaria en función de la programación especificada .....	91
Figura 56 – Relé de estado sólido para el encendido y apagado de bombillas .....	92
Figura 57 – Características del relé (12 A) .....	92
Figura 58 – Línea de aparcamiento con 4 nodos por cada sección .....	93
Figura 59 – Comunicación de nodos FFD a nodo coordinador.....	94
Figura 60 – Opciones de almacenamiento y conexión a internet .....	95
Figura 61 – Esquema ilustrativo de los componentes en una farola.....	96
Figura 62 – Chip LED Cree y luminaria con los chips integrados en la placa .....	98
Figura 63 – Nodo sensor MicaZ, de Crossbow.....	99
Figura 64 – Waspote, de Libelium .....	100
Figura 65 – iSENSE, controlador de nivel de CO <sub>2</sub> , de Coalsenses .....	100
Figura 66 – Placa Jennic JN5121 .....	101
Figura 67 – Arduino Sensor Shield.....	102
Figura 68 – Distribución de costes.....	104
Figura 69 – Parámetros de la inversión .....	105



# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Evaluación objetivo del consumo de energía en alumbrado exterior (ktep) .....	21
Tabla 2 – Bandas de frecuencias empleadas por el estándar IEEE802.15.4 .....	63
Tabla 3 – Tecnologías de transmisión por radio .....	67
Tabla 4 – Consumo por actividad del nodo .....	86
Tabla 5 – Nivel de vida de la batería .....	86



# 1. INTRODUCCIÓN

---

A medida que transcurre el tiempo la sociedad evoluciona, las ciudades crecen, se modernizan, mejoran su infraestructura y se ofrecen más y mejores servicios a sus ciudadanos. Esto ha hecho que durante muchos años las ciudades se hayan desarrollado sin pensar en lo que vendrá más adelante, contaminando el medio ambiente y consumiendo mucha energía y de forma ineficiente. Ante esta situación, y gracias a las innovaciones tecnológicas en materia de comunicaciones, se están adoptando medidas para dirigir la evolución de las ciudades hacia un modelo de ciudad inteligente y sostenible.

Las redes de comunicaciones constituyen uno de los pilares sobre los que se asienta la sociedad, que se encuentra siempre en contacto con su entorno. Cada vez más, se tiene una mayor necesidad de conocer lo que ocurre en el entorno en tiempo real solicitando información climatológica en una determinada ubicación, permitiendo conocer el estado del tráfico para elegir la ruta hacia el trabajo, saber el tiempo que tardará el autobús en llegar a la parada, etc. Como éstos, se podrían citar muchos más ejemplos de necesidades y servicios que demandan hoy día la sociedad y que, seguramente, nadie pensaba que las iba a necesitar hace unos años.

Muchos de estos servicios en tiempo real se consiguen gracias a las redes de sensores inalámbricas. Consiste en desplegar una serie de diminutos sensores en una zona determinada con el objetivo de recoger la información del medio, procesarla y modelarla para que esté disponible para los usuarios. Observando la tendencia seguida por las Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones (TIC) se puede constatar una continua evolución hacia los dispositivos embebidos, de cada vez más pequeño tamaño y menor consumo y, al mismo tiempo, con mayor capacidad de proceso y memoria y facilidad para las comunicaciones.

Siguiendo esta línea, se está construyendo la ciudad inteligente con capacidad para pensar y tomar decisiones, pero hay que dotarla de cierto grado de eficiencia. Se trata de aprovechar los recursos de la naturaleza para crear fuentes de energías limpias e ilimitadas. Empleando las tecnologías oportunas para transformar, por ejemplo, la energía del Sol o la energía del viento en electricidad, se puede alcanzar el modelo de ciudad que se pretende.

## 1.1. Objetivos

Debido al continuo crecimiento del gasto por el consumo de electricidad en las instalaciones de alumbrado público se hace indispensable buscar modelos de desarrollo que lo orienten a reducir este gasto y, como mínimo, ofrezcan la misma calidad de



servicio (QoS) a los ciudadanos. Por ello, el objetivo primero es la de entender qué tecnologías lo va a permitir y cómo se puede conseguir.

Por otra parte, hasta el momento las farolas que forman parte del sistema de alumbrado público tenían la funcionalidad de iluminar las calles, carreteras, parques, jardines, etc. Pues bien, ahora se propone aprovechar su emplazamiento para ofrecer un servicio adicional empleando una red de sensores inalámbrica. Ejemplo de estos servicios pueden ser la de monitorización de las condiciones ambientales, tales como temperatura, humedad y radiación solar o la de encender y/o apagar remotamente las luminarias para favorecer la eficiencia de la instalación.

## 1.2. Contenidos

La redacción del presente trabajo se ha dividido en seis capítulos:

- Capítulo 1: Introducción.

En el presente capítulo se realiza una introducción sobre los temas a tratar y se indican los objetivos.

- Capítulo 2: Alumbrado público.

En esta parte, se analizan los orígenes de las fuentes luminosas empleadas en el alumbrado público desde sus comienzos y se profundiza un poco en los modelos actuales y la tendencia actual. Además se introduce en el mundo de la *Smart City*.

- Capítulo 3: Energías renovables.

El tercer capítulo recoge el estado de la situación de la energía solar fotovoltaica. Asimismo se explican los elementos que debe incluir una instalación solar tanto para sistemas conectados a la red como aislados.

- Capítulo 4: Tecnología de comunicaciones y red de sensores inalámbrica

Se presentan las bases teóricas de las redes de sensores inalámbricas (topología, función de los distintos elementos, etc.) y se comentan las tecnologías para estas comunicaciones.

- Capítulo 5: Aplicaciones en el sistema de alumbrado. Diseño del sistema

Llegados a este punto se intentará aplicar todos los conceptos estudiados para dar una solución al diseño de una farola con la integración de las tecnologías mencionadas. Se elabora una propuesta económica basándose en los materiales empleados y se observa el estado del mercado.



- Capítulo 6: Conclusiones.

Se hace un balance sobre los conceptos aplicados.



## 2. ALUMBRADO PÚBLICO

---

### 2.1. Definición

El alumbrado público es el servicio que consiste en la iluminación vías públicas, parques públicos, y demás espacios de libre circulación, tanto para peatones como para vehículos, que no se encuentren a cargo de ninguna persona natural o jurídica de derecho privado o público, diferente del municipio, con el objetivo de proporcionar la visibilidad adecuada para el normal desarrollo de las actividades.

Por lo general, el alumbrado público en las ciudades o en los centros urbanos es un servicio municipal el cual se encarga de su instalación, aunque en carreteras o infraestructura vial importante corresponde al gobierno central o regional su implementación. Este servicio de alumbrado público asocia el grado de progreso material del municipio; forma parte de su imagen y genera un entorno de mayor seguridad para población, por lo que puede dar a la ciudadanía una mejor calidad de vida.



**Figura 1 – Ejemplo de alumbrado público**

Como servicio básico, ofrece beneficios para el conjunto de la población y tiene como finalidad satisfacer las condiciones básicas de iluminación de las calles y el servicio a peatones y vehículos en vialidades, así como espacios públicos: plazas, parques y jardines. Como resultado del crecimiento de la población y del desarrollo urbano, es uno de los servicios mayores demandados, sin embargo, su instalación requiere de importantes inversiones. De esta forma, a los gobiernos municipales que viven este problema les urge encontrar formas para avanzar en el análisis, evaluación e instrumentación de opciones que les permitan enfrentar la demanda de servicios de alumbrado público al menor costo posible para sus comunidades. Así, parte de este trabajo consiste en encontrar las medidas tecno-económicas que los ayuntamientos y gobiernos demandan para satisfacer las necesidades de la población.

## 2.2. State of the Art

### 2.2.1. Orígenes

Para hablar de los orígenes de la luz y su empleo en el alumbrado público se tendría que remontar a la invención del fuego y al control del mismo por parte de los humanos, pues se empleaba para iluminar algunos lugares mediante antorchas. Como este sistema era engorroso y poco duradero fueron apareciendo luminarias con diferentes aceites y mechas que permitían iluminar durante más tiempo y de forma más cómoda. Las primeras lámparas datan del año 8000 a.C. encontradas en Mesopotamia.

Las primeras ordenanzas que trataban de iniciar normativas de alumbrado público tienen su origen en Francia en el siglo XVI y obligaban a los vecinos a colgar una luz en la puerta de sus casas y hasta 1558 no se colocaron faroles en las calles. En 1662, el abate Laudati Carraffe organizó un cuerpo de vigilancia nocturna encargado de encenderlos y apagarlos. En 1667, el teniente de policía Le Reynie reformó y fijó el alumbrado público. Uno de sus sucesores, Sartines, introdujo el empleo de reflectores o reverberos y en 1818 fue adoptado el gas, extendiéndose después a todas las ciudades importantes del mundo.

La primera utilización del alumbrado por gas para la iluminación pública fue en 1807, cuando Frederick Albert Winsor iluminó uno de los lados de la calle Pall Mall de Londres, tras mejorar el sistema que años antes había investigado el francés Philippe Lebon.

Con esto, las primeras farolas de gas requerían que un farolero recorriese las calles al atardecer para ir encendiéndolas, pero años después se empezaron a emplear dispositivos de encendido automático que prendían la llama al activarse el paso de gas. Las primeras farolas fueron fabricadas en el Imperio Árabe.



Figura 2 – Farolero en la tarea de encendido

Las primeras farolas eléctricas empleadas, eran del tipo arco eléctrico, inicialmente las velas eléctricas, velas Jablochhoff o velas Yablochkov desarrolladas por el ruso Pavel Yablochkov en 1875. Se trataban de lámparas de arco eléctrico con electrodos de carbón que empleaban corriente alterna garantizaba que los electrodos ardieran de forma regular. Las velas Yablochkov fueron usadas por primera vez para alumbrar los grandes almacenes Grand Magasins de Louvre, en París en los años 1880. Poco después fueron instaladas de forma experimental en el puente Holborn Viaducty la calle Thames Embankment de Londres. Más de 4000 de estas lámparas estaban en uso en 1881, aunque por entonces ya se habían desarrollado mejoras en las lámparas de arco diferencial por parte de Friederich von Hefner-Alteneck de la empresa alemana Siemens & Halske. En los Estados Unidos fue rápida la adopción del alumbrado de arco. En 1890 había instaladas alrededor de 130.000.

Como dato, la ciudad rumana de Timișoara fue la primera de la Europa continental en contar con alumbrado público por electricidad. El 12 de noviembre de 1884 instaló 731 lámparas.

Por su parte, en España la población de Comillas (Cantabria) fue la primera localidad española en disponer de luz eléctrica en sus calles en 1881, como atestiguan las crónicas de la época durante el verano regio de Alfonso XII, invitado por el Marqués de Comillas, y la celebración de un Consejo de Ministros en la villa. En el año 1890, Jerez de la Frontera y Haro fueron las primeras ciudades españolas en hacer uso de alumbrado público por electricidad. El Ayuntamiento de Jerez fue el primero en comenzar a instalar este tipo de alumbrado en sus calles, mientras que Haro fue el primero en completar el proceso de instalación en todo su entramado urbano.

### 2.2.2. Evolución

La luz de arco eléctrico fue tomando fuerza en la instalación como fuente luminosa exterior, sin embargo presentaba dos grandes inconvenientes, pues emitía una luz muy intensa y presentaba un gran desprendimiento de calor. Este sistema resultó útil en zonas industriales como astilleros y bastante incómodas para las calles de las ciudades. A todo esto había que sumar una dificultad adicional provocada por la alta temperatura que alcanzaban los electrodos de carbón, lo que hacía que se desgastara muy rápido y con ello la necesidad de mantenimiento de las luminarias.

Esto fue cambiando cuando a finales del siglo XIX, con el desarrollo de lámparas incandescentes baratas, brillantes y fiables, las de luz de arco quedaron en desuso para el alumbrado público, permaneciendo únicamente para usos industriales.

La lámpara fluorescente se usó brevemente después de la lámpara incandescente en alumbrado público, principalmente debido a que no es una fuente puntual de luz, aun cuando son más eficientes que las lámparas incandescentes.

Más adelante, se desarrolló la lámpara de vapor de mercurio de alta presión (VMAP), que es una lámpara de arco eléctrico cuya descarga ocurre dentro de un gas





bajo alta presión, por lo que se llamó HID, por sus siglas en inglés *High Intensity Discharge*, también se conocen como DAI, Descarga en Alta Intensidad. En estas lámparas debido a la degradación de los componentes internos, se pierde intensidad luminosa rápidamente, pero es una fuente puntual de luz. Posterior a la lámpara de vapor de mercurio, se desarrolló la lámpara de vapor de sodio de baja presión (VSBP), que emite una luz monocromática, después se empleó la lámpara de vapor de sodio de alta presión (VSAP), cuya luz es de color ámbar, pero tiene un índice de rendimiento de color un poco mayor, es una fuente de luz más puntual y de un tamaño menor que la lámpara de vapor de sodio de baja presión, lo que facilita su manejo y permite un mejor diseño de los luminarias, esta lámpara entra dentro de la categoría de lámparas de descarga de alta intensidad. Por tanto, el tipo de gas y la presión a la que se somete determina los diferentes tipos de lámpara con sus propias características lumínicas. La excitación de un gas sometido a descargas eléctricas entre dos electrodos es la que produce la luz de estas lámparas. Se comentarán brevemente las más empleadas hasta la llegada de la última tecnología: el LED.

### 2.2.2.1 Vapor de Mercurio a Alta Presión

A medida que se aumenta la presión del vapor de mercurio en el interior del tubo de descarga, la radiación ultravioleta característica de la lámpara a baja presión pierde importancia respecto a las emisiones en la zona visible (violeta de 404,7 nm, azul 435,8 nm, verde 546,1 nm y amarillo 579 nm).

En estas condiciones la luz emitida es de color azul verdoso al no contener radiaciones rojas. Para resolver este problema se acostumbra a añadir sustancias fluorescentes que emitan en esta zona del espectro mejorando de esta forma las características cromáticas de la lámpara. Éstas se conocen como lámparas de vapor de mercurio de color corregido, donde la temperatura de color se mueve entre 3500 y 4500 K con índices de rendimiento en color de 40 a 45 normalmente. La vida útil, teniendo en cuenta la depreciación, se establece en unas 8000 horas. La eficacia oscila entre 40 y 60 lm/W y aumenta con la potencia, aunque para una misma potencia es posible incrementar la eficacia añadiendo un recubrimiento de polvos fosforescentes que conviertan la parte de luz ultravioleta en visible.

Los modelos más habituales de estas lámparas tienen una tensión de encendido entre 150 y 180 V que permite conectarlas a la red de 220 V sin necesidad de arrancadores desde la red. Para encenderlas se recurre a un electrodo auxiliar próximo a uno de los electrodos principales que ioniza el gas inerte contenido en el tubo y facilita el inicio de la descarga entre los electrodos principales. A continuación se inicia un periodo transitorio de unos cuatro minutos, caracterizado porque la luz pasa de un tono violeta a blanco azulado, en el que se produce la vaporización del mercurio y un incremento progresivo de la presión del vapor y el flujo luminoso hasta alcanzar el equilibrio de funcionamiento. En este estado se alcanzan temperaturas y presiones en el tubo de descarga muy altas, del orden de 357 °C y  $2 \cdot 10^5$  a  $20 \cdot 10^5$  Pa. Si en estos



momentos se apagara la lámpara no sería posible su reencendido hasta que se enfriara, puesto que la alta presión del mercurio haría necesaria una tensión de ruptura muy alta.

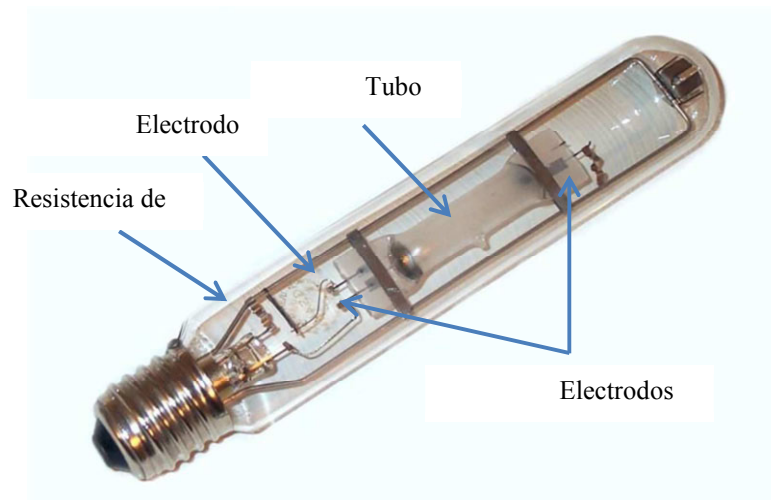


Figura 3 – Lámpara de Vapor de Mercurio a Alta Presión

### Lámparas con halogenuros metálicos

Se trata de una lámpara de la familia alta intensidad de descarga, pues derivan de las lámparas de vapor de mercurio de alta presión con la incorporación de aditivos metálicos para mejorar la capacidad de reproducir el color.

Los resultados de estas aportaciones son una temperatura de color de 3000 a 6000 K dependiendo de los yoduros añadidos y un rendimiento del color de entre 65 y 85. La eficiencia de estas lámparas ronda entre los 60 y 96 lm/W y su vida media es de unas 10.000 horas. Tienen un periodo de encendido de unos diez minutos, que es el tiempo necesario hasta que se estabiliza la descarga. Para su funcionamiento es necesario un dispositivo especial de encendido, puesto que las tensiones de arranque son muy elevadas (1500-5000 V).

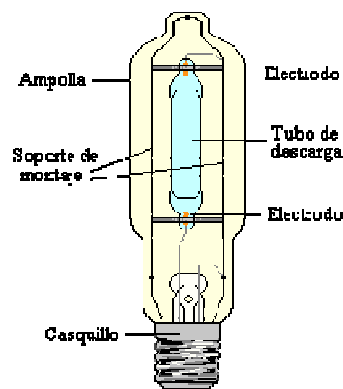


Figura 4 – Lámpara de vapor de mercurio con halogenuros metálicos

Las lámparas de vapor de mercurio de alta presión han sido muy instaladas como alumbrado exterior a lo largo del tiempo, si bien, actualmente, se encuentran en desuso.

Por su parte, en los modelos con halogenuros metálicos, las excelentes prestaciones cromáticas la hacen adecuada entre otras para la iluminación de instalaciones deportivas, para retransmisiones de TV, estudios de cine, proyectores, etc. Son muy empleadas en zonas residenciales y peatonales.

### 2.2.2.2 Vapor de Sodio

#### Lámparas de vapor de sodio a baja presión

La descarga eléctrica en un tubo con vapor de sodio a baja presión produce una radiación monocromática característica formada por dos rayas en el espectro (589 nm y 589,6 nm) muy próximas entre sí de forma que la radiación emitida, de color amarillo, está muy próxima al máximo de sensibilidad ojo humano (ésta se produce en 555 nm). Por ello, la eficacia de estas lámparas es muy elevada (entre 160 y 180 lm/W). Otras ventajas que ofrece es que permite una gran comodidad y agudeza visual, además de una buena percepción de contrastes. Por contra, su monocromatismo hace que la reproducción de colores y el rendimiento en color sean muy malos haciendo imposible distinguir los colores de los objetos.

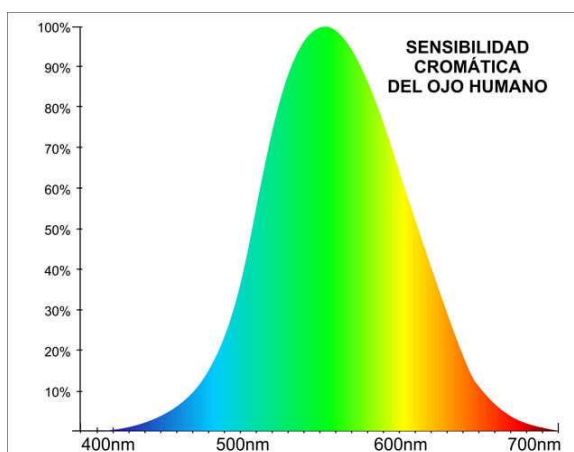
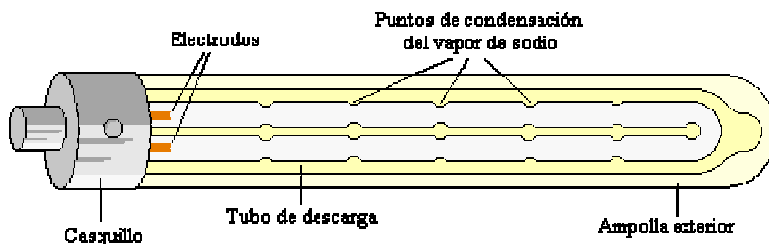


Figura 5 – Sensibilidad cromática del ojo humano

Presenta la ventaja de que su nivel de vida alcanza las 15.000 horas, sin embargo debido a factores como la pérdida de un porcentaje del flujo luminoso con el tiempo hacen que la vida útil de este tipo de lámparas varía entre 6.000 y 8.000 horas. El fin de su vida útil se produce por agotamiento de la sustancia emisora de electrones como ocurre en otras lámparas de descarga. Aunque también se puede producir por deterioro del tubo de descarga o de la ampolla exterior.

En estas lámparas el tubo de descarga tiene forma de U para disminuir las pérdidas por calor y reducir el tamaño de la lámpara. Está elaborado de materiales muy resistentes pues el sodio es muy corrosivo y se le practican unas pequeñas hendiduras para facilitar la concentración del sodio y que se vaporice a la temperatura menor posible. El tubo está encerrado en una ampolla en la que se ha practicado el vacío con

objeto de aumentar el aislamiento térmico y así mantener la temperatura de operación ( $270^{\circ}\text{C}$ ).



**Figura 6 – Lámpara de vapor de sodio a baja presión**

El tiempo de arranque de una lámpara de este tipo es de unos diez minutos. Es el tiempo necesario desde que se inicia la descarga en el tubo en una mezcla de gases inertes (neón y argón) hasta que se vaporiza todo el sodio y comienza a emitir luz. Físicamente esto se corresponde a pasar de una luz roja (propia del neón) a la amarilla característica del sodio. Se procede así para reducir la tensión de encendido.

Ante la ventaja de ser la lámpara con la mayor eficiencia del mercado sus aplicaciones en el alumbrado público están muy limitadas a zonas específicas (túneles, autopistas, áreas industriales) debido a la deficiencia en las características de los colores (emite luz monocromática). Estas lámparas se emplean mucho en el alumbrado público por la agudeza visual y la eficiencia y cuando no prima a distinción de los colores.

### **Lámparas de vapor de sodio a alta presión**

La distribución espectral del vapor de sodio de alta presión abarca casi todo el espectro visible de forma que proporciona una luz blanca dorada más agradable que la anterior, lo que se traduce en un rendimiento en color ( $T_{\text{color}} = 2100\text{ K}$ ) y capacidad para reproducir los colores mucho mejores que la de las lámparas a baja presión ( $\text{IRC} = 25$ , aunque hay modelos que alcanzan un IRC de 65 e, incluso, 80). Esto se consigue a base de sacrificar eficacia, aunque su valor sigue siendo un valor alto comparado con los de otros tipos de lámparas ( $130\text{ lm/W}$ ).

La vida media de este tipo de lámparas ronda las 20.000 horas y su vida útil entre 8.000 y 12.000 horas. Entre las causas que limitan la duración de la lámpara, además de la depreciación del flujo, destaca el posible fallo por fugas en el tubo de descarga y del incremento progresivo de la tensión de encendido necesaria hasta niveles que impiden su correcto funcionamiento.

Para este tipo de lámparas, las condiciones de funcionamiento son muy exigentes debido a las altas temperaturas ( $1000^{\circ}\text{C}$ ), la presión y las agresiones químicas producidas por el sodio que debe soportar el tubo de descarga. En su interior hay una mezcla de sodio, vapor de mercurio que actúa como amortiguador de la descarga y xenón que sirve para facilitar el arranque y reducir las pérdidas térmicas. El tubo está

rodeado por una ampolla en la que se ha hecho el vacío. La tensión de encendido de estas lámparas es muy elevada y su tiempo de arranque es muy breve.

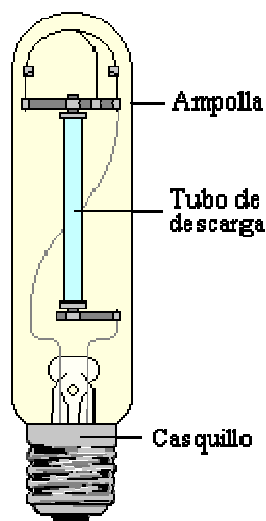


Figura 7 – Lámpara de vapor de sodio a alta presión

Este tipo de lámparas tienen muchos usos posibles tanto en iluminación de interiores como de exteriores. Es habitual encontrarlas en naves industriales, en el alumbrado público o como iluminación decorativa.

### 2.2.2.3 Inducción Magnética

Las lámparas de inducción electromagnética son lámparas fluorescentes que funcionan mediante un campo magnético, parecido a los tubos fluorescentes pero sin los electrodos para inducir la corriente en el interior. La rotura o desgaste del electrodo son las principales causas de fallo de las lámparas de descarga, ya sean de halogenuros, vapor de sodio o fluorescentes. Se llega a considerar que gracias a este principio de la inducción electromagnética se puede alcanzar un ciclo de vida hasta de 100.000 horas. Esta es una ventaja muy importante para las instalaciones en alumbrado público o en grandes alturas donde el mantenimiento es muy costoso debido a la accesibilidad.

Estas lámparas producen luz visible de excelente calidad sin parpadeos, con una alta eficacia luminosa (70 a 85 lm/W) y un alto índice de rendimiento de color, (IRC) entorno a 80.

Las lámparas de descarga electromagnética utilizan un inductor de ferrita alrededor del cual se enrolla un cable. Al circular la corriente en las bobinas, se genera un campo electro-magnético intenso de alta frecuencia en el núcleo de ferrita y se transfiere este campo magnético al entorno cercano al núcleo, lo que ioniza el gas contenido en los focos (esféricos, tubulares circulares o tubulares rectangulares) y se produce un flujo de electrones libres con un estado energético alto en el gas. Al regresar a su estado energético original estable, estos electrones emiten luz ultravioleta.

Esta luz ultravioleta es convertida en luz visible al pasar por la superficie interna de la lámpara recubierta con fósforo, de tal manera que al variar la composición de dicho recubrimiento de fósforo, podemos controlar la temperatura de color de la luz visible emitida, en un rango que va desde 2700°K hasta los 6500°K.

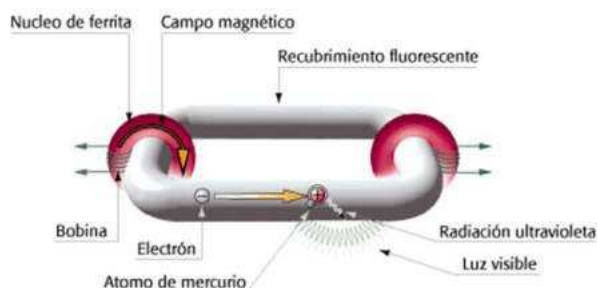


Figura 8 – Lámpara de inducción magnética

Por sus características, estas lámparas se emplean tanto para alumbrado de interiores como de exteriores. En instalaciones interiores se pueden encontrar para el alumbrado de almacenes, bodegas, andenes de carga, centros comerciales, gasolineras y talleres, entre otras y en el exterior para el alumbrado de parque y jardines, corredores industriales, estadios, plazas, etc.

#### 2.2.2.4 LED

El último avance o tecnología disponible en el mercado empleado para iluminación, tanto de espacios interiores como exteriores es el LED. Los LEDs son componentes eléctricos semiconductores (diodos) capaces de emitir luz al ser atravesados por una pequeña corriente. Las siglas “LED” provienen del acrónimo en inglés “*Light Emitting Diode*”, que traducido al español sería diodo emisor de luz. Por tanto, es una evolución del tradicional diodo electrónico para la emisión de un haz luminoso y se clasifica como un sistema de iluminación en estado sólido (SSL). Los primeros LEDs datan de 1962 que, combinado Galio, Arsénico y Fósforo (GaAsP) se consiguió un LED con una frecuencia de emisión aproximadamente de 650 nm. Desde entonces ha ido evolucionando empleando distintos materiales y semiconductores y consiguiendo tonos de luces de los distintos colores, mayores flujos luminosos.

El fenómeno de la emisión de luz está basado en la teoría de bandas, por la cual, una tensión externa aplicada a una unión p-n polarizada directamente, excita los electrones, de manera que son capaces de atravesar la banda de energía que separa las dos regiones. Si la energía es suficiente los electrones escapan del material en forma de fotones. Cada material semiconductor tiene unas determinadas características que determina la longitud de onda de la luz emitida.



A diferencia de las lámparas de incandescencia cuyo funcionamiento es por una determinada tensión, los LEDs funcionan por la corriente que los atraviesa.

En la actualidad el sistema de iluminación por LED es el más versátil del mercado ya que se puede adaptar a la mayoría de los casos, ya que consiste en la incorporación de los chips LED en una placa, la cual se integra en la luminaria requerida para cada aplicación. Se emplean, por tanto, en el alumbrado de interiores como focos, bombillas, tubos, etc., en alumbrado decorativo al permitir la posibilidad de ser regulable en intensidad o bien atender a las funciones especificadas por sistemas de control. Para el caso del alumbrado público, características que se enumeran a continuación hacen que se encuentren en la forma de alumbrado que se está imponiendo en la actualidad:

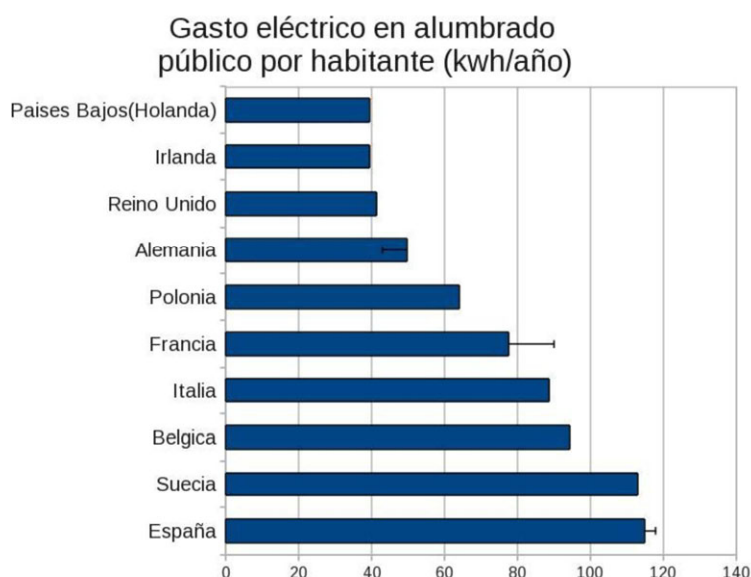
- Ciclo de vida elevado, entorno a las 50.000 horas, lo que conlleva menos sustituciones, recambios y ahorra costes de mantenimiento.
- Alto ahorro energético, lo que produce mayor número de lm/W. actualmente, está alrededor de los 100 lm/W aunque las primeras marcas tienen modelos con valores de 130 lm/W.
- El LED son un sistema de iluminación direccional, esto es, concentra el haz luminoso de forma que se ilumina lo que se quiere. Esto favorece la eficiencia energética y no produce contaminación luminosa.
- Encendido instantáneo. El LED está totalmente preparado para encenderse instantáneamente y no se ve afectado por el número de encendidos al día, como sí le ocurre con otros sistemas donde el encendido depende del calentamiento de un gas y puede tardar 10 minutos en alcanzar su máxima intensidad luminosa. Por tanto, el nivel de vida, no se ve afectado por el encendido.
- A diferencia de los modelos anteriores, no contienen mercurio ni otros gases, de forma que no son contaminantes y favorece la huella de carbono.
- No emiten radiaciones UV ni IR.
- Las características cromáticas del LED (el IRC suele ser de 80) permiten el cumplimiento de la normativa de eficiencia energética en el alumbrado público, pues cada vez son más exigentes con la calidad de la luz.
- Baja tensión de funcionamiento.
- No necesitan circuitos adicionales para aprovechar toda la energía suministrada por la red eléctrica (factor de potencia  $> 0,9$ ).





### 2.2.3. Situación actual

El contexto económico en el que se encuentran inmersos los países de la Unión Europea en los últimos años hace que los poderes políticos hayan adoptado una actitud bien diferenciada hasta el momento: se trata de una convergencia entre la evolución tecnológica de las ciudades, conocidas como *Smart cities*, y la eficiencia energética, lo que conlleve ahorros económicos a largo plazo. Esto, extrapolándolo al campo del alumbrado público trata de un análisis de las instalaciones de alumbrado público existente hasta el momento y la búsqueda de un modelo de gestión eficiente de los mismos. Pues, conviene saber que España país con el gasto anual en alumbrado público por habitante mayor de la Unión Europea. La Figura 9 muestra las cifras de estos consumos siendo para España del orden de 118 KW/h por ciudadano, frente a los 90-97 KW/h de Francia o los 43-45 KW/h de Alemania.



**Figura 9 – Gasto en alumbrado público por habitante y año**

El crecimiento del gasto anual en alumbrado público se sitúa en un 4,7%, frente al 0,7% de crecimiento de la población y España es el país de la Unión Europea con mayor densidad de población en área construida, por lo que iluminar debería ser mucho más barato que en otros países.

Para tener unas referencias numéricas, se estima que entre los años 2010 y 2011 el número de puntos de luz que formaban parte del parque de alumbrado exterior en España era de 4.800.000 unidades, que con una potencia media de 180 W y 4.200 horas de utilización anual, representó un consumo de electricidad de 3.629 GWh/año.

La contaminación lumínica supone un consumo innecesario de energía y puede implicar una afección en las personas, dificultar la visión natural del cielo y poner en peligro el equilibrio de determinados ecosistemas. La contaminación lumínica se origina cuando se emite un flujo luminoso, proveniente de fuentes de iluminación artificial, en direcciones, intensidades y rangos espectrales innecesarios para la actividad prevista.





También se debe al uso excesivo e irresponsable del alumbrado de exteriores, como la iluminación publicitaria no controlada, el empleo de niveles luminosos excesivos, la ausencia de horarios de apagados de la iluminación ornamental y de espacios deportivos, etc. Esto ha suscitado que, en ocasiones, se tenga una concepción errónea del problema, creyendo que se evitaría la contaminación lumínica si se dejara de usar la iluminación artificial nocturna, cuando lo que se requiere es realizar un buen diseño de la misma, una correcta ejecución de la correspondiente obra y una gestión eficiente de su funcionamiento.

Diversos estudios que emplean mapas de contaminación lumínica e imágenes por satélite ponen de manifiesto que España tiene un alto consumo en alumbrado público siendo uno de los más derrochadores de toda Europa. Con esto, se encuentra en la cola en eficiencia energética. Como ejemplo de estos estudios puede consultarse el artículo "*Highlights of Spanish Astrophysics VI*", del Departamento de Astrofísica de la UCM.

La eficiencia energética y la reducción de la contaminación lumínica en las instalaciones de alumbrado público constituyen un objetivo prioritario para España y la Unión Europea. De esta forma, el 29 de Julio de 2011, el Consejo de Ministros aprobó el 2º Plan Nacional de Eficiencia Energética de España 2011-2020, que da continuidad a los planes de ahorro y eficiencia energética anteriormente aprobados en el marco de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2010, y que da cumplimiento a la Directiva 2006/32/CE sobre eficiencia en el uso final de la energía y los servicios energéticos. Este último Plan fue diseñado con un propósito claramente identificado, el cumplimiento de los objetivos 20-20-20, esto es, conseguir un 20% de reducción del consumo energético, que un 20% de energía final proceda de fuentes de energías renovables y, además, lograr reducir en un 20% las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

	2010 ktep	2016 ktep	2020 ktep	Porcentaje 2020/2010
<b>Consumo total</b>	326	333	305	94%

**Tabla 1 – Evaluación objetivo del consumo de energía en alumbrado exterior (ktep)**

Tal y como se ve, a lo largo de la década 2010-2020 el sector del alumbrado exterior deberá experimentar una reducción de un 6% en el consumo eléctrico. Esto se podrá conseguir gracias a los avances tecnológicos, modificaciones de las normativas (publicación del Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior, RD 1890/2008) y la admisión de la contratación de empresas de servicios energéticos (ESEs) por las administraciones públicas.

Como se sabe, las instalaciones de alumbrado público se proyectan y ejecutan en un corto tiempo, incorporando, la mayoría de las veces, los elementos energéticamente más eficientes del momento. No obstante, su funcionamiento se prolonga durante bastantes años y, si no se renuevan ni sustituyen sus componentes iniciales por los que



el desarrollo tecnológico ha ido poniendo en el mercado, cada vez serán menos eficientes. Por todo esto, más adelante se propone un sistema que cumple con todos los puntos mencionados y que se acerque a un modelo de Ciudad Inteligente.

## 2.3. Smart City

Las ciudades tienen un gran impacto en el desarrollo económico y social de las naciones. Son verdaderas plataformas donde las personas viven y trabajan, donde las empresas desarrollan su actividad y en el marco de las cuales se prestan numerosos servicios.

El siglo XXI está llamado a ser el siglo de las ciudades. Como dato a favor de este desarrollo, ya en julio de 2007 la población urbana sobrepasó a la población rural en el mundo. Además, se prevé que esta proporción se incremente notablemente en los próximos años, hasta el punto que, según algunas previsiones, en el año 2050 prácticamente el 70% de la población mundial se haga urbana y muchas de las ciudades cuenten con más de 10 millones de habitantes. Se estima que en 2025, solo en China, habrá 221 ciudades que superen el millón de personas, mientras que Europa tiene en la actualidad 35.

Para hacerse una idea de la gran actividad que se desarrolla en las ciudades, se estima que, en la actualidad, las ciudades consumen el 75% de los recursos y de la energía mundial y que generan el 80% de los gases responsables del efecto invernadero, ocupando tan sólo el 2% del territorio mundial.

Ante este escenario que muestra un entorno urbano con una demanda creciente de eficiencia, desarrollo sostenible, calidad de vida y sabia gestión de los recursos, las Administraciones públicas han de plantearse una evolución en los modelos de gestión de las ciudades. Para ello, la aplicación de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) se hace imprescindible y se traduce en el concepto *Smart City*, que adelanta, con sus servicios, la que ha dado en denominarse Internet de las cosas y la propia Internet del Futuro.

De esta forma, se define *Smart City* (traducido al castellano como Ciudad Inteligente) como aquella ciudad que usa las tecnologías de la información y las comunicaciones para hacer que tanto su infraestructura crítica, como sus componentes y servicios públicos ofrecidos sean más interactivos, eficientes y los ciudadanos puedan ser más conscientes de ellos. Es una ciudad comprometida con su entorno, tanto desde el punto de vista medioambiental como en lo relativo a los elementos culturales e históricos.

Desde el punto de vista tecnológico, una Smart City viene a ser un sistema de gran complejidad (*'system of systems'*), o un ecosistema en el que co-existen múltiples procesos íntimamente ligados y que resulta difícil abordar de forma individualizada.



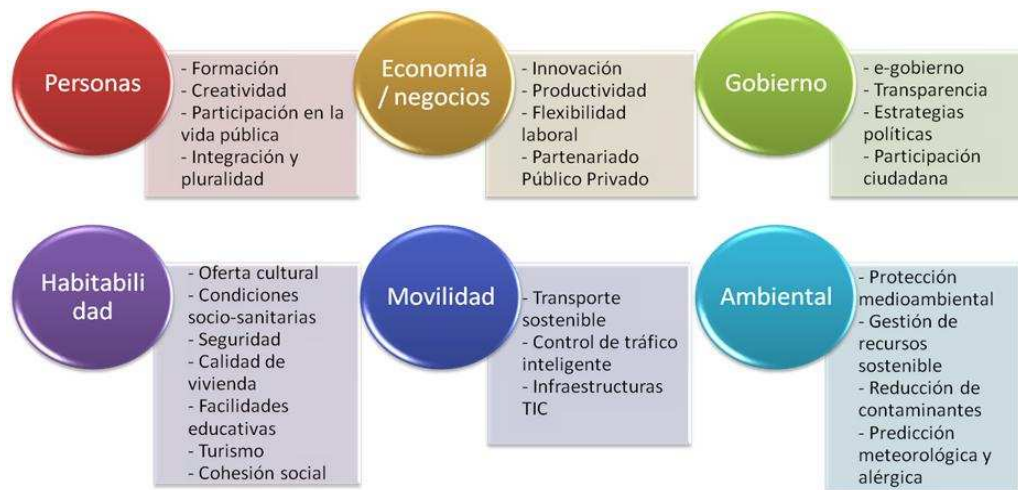
En la práctica, y a un nivel más popular, seguramente entendemos que una *Smart City* es una ciudad comprometida con su entorno, con elementos arquitectónicos de vanguardia, y donde las infraestructuras están dotadas de las soluciones tecnológicas más avanzadas para facilitar la interacción del ciudadano con los elementos urbanos, haciendo su vida más fácil. El entorno hace referencia tanto a los aspectos medioambientales como a los elementos culturales e históricos. Un planteamiento como el descrito exige a aquellas ciudades que aspiren a ser consideradas como ‘inteligentes’ a renovar y mejorar constantemente las soluciones tecnológicas aplicadas, con el fin de mejorar la eficiencia de sus procesos y la calidad de vida en su entorno. Esto nos lleva a un detalle importante: la categoría ‘*smart*’ no es duradera, es decir, no está asociada a la consecución de una meta, sino que implica más bien el compromiso por parte de los distintos agentes involucrados en un proceso constante de mejora, con un potencial casi infinito, y una meta no menos lejana.

El concepto de *Smart City* camina de la mano con el Internet de las Cosas, ya que ambos tienen en las comunicaciones M2M (*Machine to Machine*) su fundamento y adelantan, con sus aplicaciones y usos, la que está llamada a ser el Internet del futuro, también conocido como *Internet of Things* (IoT). Un Internet que no solo consistirá en la conexión de cada vez más personas, sino en el planteamiento de un mundo digital en el que, idealmente, todo podrá estar conectado. Desde dispositivos, hasta objetos del mundo físico que habitualmente no disponían de esta conectividad; es el caso de los elementos urbanos, de los edificios, los coches, los electrodomésticos, los contadores, etc. y en general todo aquello que haya que gestionar o controlar. En este contexto, una *Smart City* es un sistema complejo, un ecosistema en el que intervienen múltiples agentes, en el que coexisten muchos procesos íntimamente ligados. Además, la *Smart City* se convierte en una plataforma digital que permite maximizar la economía, la sociedad, el entorno y el bienestar de las ciudades, y facilita el cambio hacia un comportamiento más sostenible entre todos los agentes: usuarios, empresas y Administración.

Por otro lado, esta evolución permite habilitar nuevos modelos de negocio, constituyendo una excelente plataforma para la innovación en su entorno.

De manera descriptiva, una *Smart City* es un espacio urbano con infraestructuras, redes y plataformas inteligentes, con millones de sensores y actuadores, dentro de los que hay que incluir también a las propias personas y a sus teléfonos móviles. En una *Smart City* la información adecuada llega en el momento preciso, integrando así “digitalmente” a las personas y a las cosas del entorno. Los espacios digital y físico se recombinan en la ciudad; por ello, constituye un primer paso de la Internet de las Cosas y por extensión, de la Internet del Futuro tal y como se ha comentado.





**Figura 10 – Sectores convergentes en una Smart City**

Son muchos los tipos de iniciativas que se enmarcan dentro de un proyecto global de *Smart City*. No todas suelen estar presentes en la implementación de una ciudad inteligente determinada, aunque para ser una verdadera *Smart City* es imprescindible tener desde el principio una visión holística de todas las necesidades de la ciudad y por lo tanto, de todo lo que se puede ofrecer en este contexto.

Los ejes en los que suele incidir un proyecto de *Smart City* tienen que ver con la movilidad urbana, la eficiencia energética y en general, la gestión sostenible de los recursos, la gestión de las infraestructuras de la ciudad, el gobierno participativo y la seguridad pública así como con las áreas de salud, educación y cultura.

### 2.3.1. Implantación tecnológica de una Smart City

No se debe confundir el concepto de *Smart City* y pensar que consiste únicamente en proveer de ciertos servicios basados en la medida tecnológica oportuna. La creación de una ciudad inteligente es algo mucho más que la provisión de ciertos servicios de forma individual. Desarrollar y desplegar una *Smart City* lleva asociada la creación de una serie de infraestructuras así como disponer de mecanismos de gestión de la información y diferentes plataformas, todo ello integrado bajo una perspectiva global.

En este proceso de implantación de las medidas y acciones necesarias para alcanzar la “cadena de valor tecnológica” de la *Smart City* se puede contemplar 5 pasos:

- 1<sup>er</sup> Paso: Recopilación de datos

Para que una *Smart City* pueda tomar el pulso a la ciudad necesita, en primer lugar, del despliegue masivo de instrumentación, como sensores y otros dispositivos de captura de datos que permitan la recolección de información, la cual, por lo general, tendrá un carácter muy diverso y desestructurado. Son

múltiples las tecnologías con las que se puede llevar a cabo, lógicamente dependiendo de su naturaleza. Ejemplos son los *smartphones* o los sensores.

- 2º Paso: Transmisión de los datos

Una vez recopilada la información se lleva a cabo el proceso de comunicación, permitiendo la transmisión de la información a servicios centrales y plataformas de almacenamiento, o bien facilitando la comunicación entre los propios dispositivos inteligentes.

Las redes de comunicaciones son las infraestructuras fundamentales que permiten la comunicación entre los dispositivos, entre las personas y entre las personas y los dispositivos. Este elemento facilita al resto de eslabones que componen la *Smart City* las comunicaciones unificadas independientemente de los estándares de red y de los protocolos de comunicación utilizados. De hecho, el mayor reto de estas tecnologías es precisamente el de gestionar el número creciente, disperso y heterogéneo de máquinas, sensores y actuadores distribuidos a lo largo de la ciudad.

- 3º Paso: Almacenamiento y tratamiento de la información.

Esta tercera fase comprende las tecnologías que permiten el tratamiento de los datos así como su posterior homogeneización para su almacenamiento en grandes bases de datos o *data warehouse*. También se encontrarían dentro de él las tecnologías para el análisis y la visualización de datos.

En los *data warehouses* se escriben los datos que son necesarios o útiles para una organización como paso intermedio para posteriormente transformarlos en información útil para el usuario. El uso de diferentes sistemas de soporte a las decisiones, herramientas de información ejecutiva y sistemas de visualización de información ayudará a la posterior tarea de análisis. Una característica fundamental que deben cumplir los *data warehouses* es la capacidad para el manejo de gran cantidad de datos en tiempo real y la necesidad de que la información esté geolocalizada.

Una capa de análisis y control se hace pues necesaria para sacar el mayor partido posible a los datos e incluso realizar actividades de previsión de comportamientos y situaciones que ayuden a plantear las diferentes políticas públicas en el ámbito local.

- 4º Paso: Plataforma de provisión de servicios

La plataforma de provisión de servicios es la encargada de que los servicios que se ofrecen se hagan de forma segura y con garantías de privacidad.



- 5º Paso: Los servicios finales de la *Smart City*

Existen múltiples posibilidades de servicios finales que pueden ofrecerse, por lo menos tantos como servicios públicos que ha de prestar un Ayuntamiento. También hay otros servicios que pueden prestarse por otros agentes que no tienen porqué ser de carácter público necesariamente pero que se van a volver indispensables para asegurar tanto la calidad de vida como la sostenibilidad en el ámbito de las ciudades. En este sentido se abren muchas oportunidades de negocio.

Por ello, hablar de tecnologías en el ámbito de los servicios finales se convierte en un tema muy amplio porque las tecnologías serán tantas y tan variadas como las utilizadas por los sectores que usen la Plataforma *Smart City* para ofrecer su servicio de valor añadido.

En definitiva, este conjunto de servicios constituirán parte de este Internet del Futuro en el que el uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones estará presente en todos los sectores y ámbitos de la actividad humana, haciendo el mundo más accesible y sostenible.

### **2.3.2. Casos de éxito de una *Smart City***

Muy lejos de que las *Smart City* se queden en una mera utopía, son múltiples las empresas que han puesto en marcha diversos proyectos que, gracias a la tecnología, el bienestar social y medioambiental pretender hacerlos realidad, o, que, en algunos casos, ya se han llevado a la práctica de la mano de la interacción.

A continuación se muestran algunos casos en que se ha implementado todo el proceso indicado anteriormente con grandes resultados. Algunos de estos pueden ser:

- Estocolmo

La ciudad de Estocolmo, a través de su estrategia Visio 2020, se está convirtiendo en una de las *Smart Cities* de referencia a nivel mundial. La capital sueca era una ciudad con un elevado volumen de tráfico, que afectaba no solo a los ciudadanos sino también a la economía, dado que no era sencillo hacer negocios o ir de compras en una ciudad totalmente colapsada.

Los gestores municipales plantearon una modelo de gestión inteligente del tráfico con tres objetivos fundamentales interrelacionados entre sí: reducir el tráfico, mejorar el transporte público y buscar la involucración ciudadana en todo el proceso. Para ello, en primer lugar, se integró un modelo de pago por peaje, que favorecía a aquellos que estaban menos tiempo en el centro de la ciudad o que accedían a horas con menos tráfico. En segundo lugar, se decidió que todo lo que se recaudara de esos peajes se destinara directamente a mejorar la red de transporte público de la ciudad y el acceso





desde la periferia al centro. Finalmente, este modelo fue aprobado por los ciudadanos antes de su ejecución definitiva mediante la celebración de dos referéndums. Como resultado, Estocolmo pasó a ser una ciudad donde se pueden hacer negocios o ir de compras de manera más eficiente y, además, una ciudad menos polucionada y con una mejor calidad de vida. Con todo ello se ha reducido el tráfico en un 20%, ha disminuido el tiempo de espera en un 25% y ha recortado las emisiones en un 12%.

- Singapur

La ciudad de Singapur está creando un sistema energético inteligente (IES – Intelligent Energy System) que, mediante el flujo bidireccional de información en la red de suministro eléctrico, permite una reducción del consumo de energía en el entorno del 3%. El despliegue de los contadores inteligentes (advanced metering infrastructures – AMI) va acompañado de la extensión de una red de comunicaciones de fibra óptica de alta velocidad.

Singapur ha creado también una de las redes de transporte público más modernas, asequibles y utilizadas del mundo. Un día normal pueden llegar a coincidir casi tres millones de personas viajando en autobús y 1.600.000 en tren. Las opciones de pago de transporte público para el transporte ahora son más simples y flexibles y encajan mejor en el estilo de vida de los viajeros. La empresa IBM ha ayudado a crear un sistema de pago que ofrece al ciudadano diferentes tarjetas en función de sus necesidades de transporte, que además simplifica y agiliza el pago de las tarifas. Además, se ha producido un descenso del 80% en las mermas de ingresos como consecuencia del funcionamiento deficiente del sistema.

Singapur es considerada por el Banco Mundial como la mejor ciudad para hacer negocios, y la más adecuada para favorecer el crecimiento de las empresas. Este entorno favorable al desarrollo y a la actividad económica también hace de Singapur una Smart City.

- Rio de Janeiro

La ciudad brasileña de Río de Janeiro se ha dotado de un Centro Inteligente de Operaciones que proporciona información de los sistemas e infraestructuras más importantes de toda la ciudad, de tal forma que los gestores disponen de una visión integrada. Gracias a ello, se ha producido un descenso de un 30% en el tiempo de respuesta en casos de emergencia. El nuevo centro ayuda a las autoridades municipales a preparar la ciudad de cara a dos eventos de la magnitud de la Copa del Mundo de fútbol de 2014 y los Juegos Olímpicos de 2016.

- Málaga

La ciudad andaluza está desarrollando su proyecto de *Smart City* con el foco puesto en la eficiencia energética. Se ha fijado como objetivo la reducción de 6.000 toneladas anuales de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, y de un 20 % del consumo de energía. Para ello, se adoptan medidas como la introducción de vehículos eléctricos y la



transformación de la red de distribución en una *Smart Grid*. El proyecto conocido como *Smart City Málaga* es un proyecto donde se integran muy diversas tecnologías en la Red Eléctrica de Distribución y se analiza cómo el modelo energético actual puede evolucionar hacia la sostenibilidad con la ayuda de estas soluciones tecnológicas. El principal objetivo es la de reducir el impacto medioambiental gracias al empleo de fuentes de energías renovables, aumentando la eficiencia energética, acercando la generación al consumo y fomentando el consumo racional y eficiente, todo esto para el cumplimiento de los objetivos europeos para el año 2020.

Para el desarrollo de este proyecto, en primer lugar, se ha monitorizado a través de una red de telecomunicaciones de tecnología PLC cada punto donde se consume, genera o almacena energía a gran escala. Con esto se dispone de un control directo y en tiempo real de lo que acontece a la red, haciendo posible optimizar el uso de la energía, reducir pérdidas de energía, mejorar la respuesta en caso de incidencia y seguir ofreciendo un servicio de calidad.

Por otro lado, los usuarios de la zona de La Misericordia, emplazamiento donde se desarrolla en proyecto, cuentan con contadores inteligentes de telegestión, a lo que hay que unir un grupo de 11 edificios y grandes clientes y 50 colaboradores residenciales que disponen de aplicaciones de eficiencia energética, esto son, sistemas que les permite monitorizar y controlar en tiempo real su consumo eléctrico vía internet. Esto constituye el complemento perfecto para la telegestión.

Otro de los puntos de este proyecto es la creación de un *microgrid*, esto, es, un parte de la red es capaz de ser autosuficiente, donde la demanda energética de alumbrado público es satisfecha con energías renovables, gracias a la instalación de una serie de aerogeneradores, sistemas fotovoltaicos y sistemas de acumulación en el Paseo Marítimo. Esto, junto con la integración de un punto de recarga para vehículos eléctricos, habilitado por la innovadora tecnología V2G, capaz no sólo de cargar baterías, sino también emplear la energía disponible e inyectarla de nuevo a la red.

- Santander

La ciudad de Santander se ha centrado en la aplicación del concepto de Internet de las Cosas y de Internet del Futuro. SmartSantander propone una plataforma experimental de investigación para el desarrollo de aplicaciones y servicios asociados a una ciudad inteligente. En la doble vertiente experimentación-servicio perseguida por el proyecto, éste además provee a la comunidad científica internacional de un banco de pruebas de estas características único y disponible a gran escala para la experimentación y la evaluación de los conceptos de la Internet de las Cosas (IoT) bajo condiciones reales. En este sentido, la plataforma está concebida como un instrumento esencial para lograr el liderazgo de la Unión Europea en el desarrollo de tecnologías para la Internet de las Cosas.

Bajo la iniciativa *FIRE* (*Future Internet Research and Experimentation*), se prevé el despliegue de un total de 20.000 sensores, instalados en las ciudades de





Belgrado, Guildford, Lübeck y Santander, con la finalidad de la explotación de una amplia variedad de tecnologías. En Santander se realizará la mayor parte del despliegue con la instalación de con 12.000 sensores.

La plataforma desarrollada será atractiva para todos los grupos de interés involucrados: empresas, comunidades de usuarios, otras entidades que desean usar la plataforma experimental para despliegues y evaluaciones de nuevos servicios y aplicaciones, así como investigadores en Internet que pueden validar sus nuevos desarrollos tecnológicos (protocolos, algoritmos, interfaces de radio, etc.).

Por tanto, esta ciudad ha tomado unas iniciativas como las mencionadas anteriormente ya que está aportando un desarrollo científico de primer nivel. No obstante, supone importantes beneficios para los ciudadanos de Santander, que pueden utilizar las tecnologías desarrolladas, existiendo actualmente dos aplicaciones móviles para ciudadanos anteriormente descritas y relacionadas con la Realidad Aumentada (*SmartSantanderRA*) y con la Recogida participativa de información (Pulso de la Ciudad).

- Madrid

Madrid tiene operativos numerosos proyectos que cabría calificar de *Smart City* centrados en los servicios a los ciudadanos, la seguridad, la sostenibilidad ambiental y la movilidad, como:

1. En el campo de los servicios a los ciudadanos, el servicio de teleasistencia domiciliaria que atiende a más de 120.000 personas mayores.
2. En materia de seguridad, el Centro Integrado de Seguridad y Emergencias de Madrid (CISEM) coordina los servicios de Bomberos, Policía Municipal, SAMUR, Protección Civil y Agentes de Movilidad, que ha conseguido tiempos de respuesta menores a 8 minutos para la policía y los bomberos, y menores a 7 minutos para el SAMUR.
3. En el campo de la movilidad, las grandes infraestructuras de Madrid se han visto acompañadas de complejos sistemas de gestión. Es el caso de la gestión integral de la flota de autobuses urbanos de la EMT, proyecto que comenzó en 2007 y permite la localización continua, instantánea y automática de los 2.100 autobuses de la EMT desde el Puesto Central de Control. Además, la EMT suministra información en tiempo real a través de numerosos canales e incluso través de una plataforma de datos abiertos disponible para desarrolladores. También destaca El Centro de Gestión de la Movilidad, inaugurado en el año 1968, que permite conocer hoy el estado de la circulación en tiempo real y reducir las congestiones de tráfico, proporcionando información a través de un sistema multicanal.



### 3. ENERGÍAS RENOVABLES

---

El crecimiento y la evolución de los países, así como el fenómeno de la globalización hacen mella en el agotamiento de los combustibles fósiles y, desde hace unos pocos años se está haciendo especial hincapié en el empleo de otras formas de energía que sean inagotables y limpias. En este sentido, se puede hablar de las energías renovables como la mejor opción para la obtención de energía y en cumplimiento de las restricciones de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Como en este estudio se pretende diseñar una pequeña instalación solar fotovoltaica se introducirán los conceptos necesarios para tomarlos en consideración.

La energía solar fotovoltaica es un tipo de energía renovable, esto es, son inagotables desde el punto de referencia del período de existencia de la humanidad. Se consideran fuentes de energía renovable: la radiación solar, la atracción gravitacional de la Luna y el Sol y el calor interno de la Tierra. Desde tiempos inmemoriales el hombre ha desarrollado técnicas para la obtención de calor y trabajo a partir de fuentes renovables de energía. Conviene matizar el concepto de renovable afirmando que se refiere a ritmos de consumo no superiores a los de producción o generación de manera natural. Más ampliamente, se consideran procesos renovables aquéllos que evitan el consumo masivo de energía y materias primas si éstas pueden ser producto de reciclaje, minimizando por tanto los efectos provocados por la producción incontrolada de basuras.

Como se sabe, la energía solar fotovoltaica presenta una de las mejores perspectivas de desarrollo, pues los costes de implantación disminuyen año tras año y ofrecen una mayor fiabilidad. Entre las aplicaciones más comunes del empleo de esta energía se puede destacar:

- Electrificación de viviendas aisladas de la red eléctrica.
- Sistemas de telecomunicaciones.
- Balizamiento y señalización.
- Sistemas de protección catódica.
- Iluminación pública con sistemas autónomos.
- Bombeo de agua para riego y abastecimiento de ganado en lugares aislados.
- Centrales eléctricas para pequeños núcleos de población alejados de la red comercial.
- Viviendas y edificios conectados a la red con sistemas de compraventa.



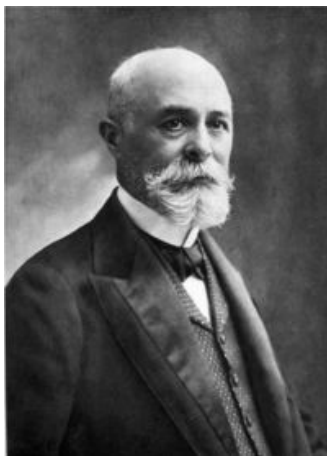
### 3.1. Historia y Evolución de la Energía Solar Fotovoltaica

Como se tiene constancia, las células fotovoltaicas se basan en la transformación de luz en energía eléctrica, pues fue el físico francés Edmund Becquerel quien, en 1839, descubriera el efecto fotovoltaico cuando experimentaba con dos electrodos metálicos en una solución conductora y constató un aumento de la generación eléctrica producida al exponerla a la luz del sol. Durante más de treinta años el descubrimiento no se explotó hasta que Heinrich Hertz estudió el efecto fotoeléctrico en los cuerpos sólidos, produciendo celdas fotovoltaicas que convertían la luz en electricidad con 1-2% de eficiencia.

Posteriormente, fueron surgiendo diferentes científicos que aportaron sus progresos a esta nueva forma de energía. En 1873, Willoughby Smith descubre la fotoconductividad del selenio y, en esta dirección, W.G. Adams y R.E. Day producen la primera célula fotovoltaica de selenio.

En 1904, Albert Einstein publica su artículo sobre el efecto fotovoltaico, que recibiría el premio Nobel en 1921. Los principios cuánticos desarrollados en los años 1920 a 1930 fundamentaron el presente modo de entender el fenómeno fotovoltaico.

No obstante, es importante destacar que fue el método Czochralski desarrollado en 1918 el que supuso uno de los mayores avances de esta tecnología, y que posibilitó en la década 1940-50 la obtención, de forma comercial, de monocristales de silicio con la pureza requerida para el desarrollo de células solares.



**Figura 11 – Edmund Becquerel. Descubridor del Efecto Fotovoltaico**

Hubo que esperar hasta 1954, cuando los investigadores D.M. Chaplin (ingeniero electrónico), C.S. Fuller (químico) y G.L. Pearson (físico), de los Laboratorios Bell, el centro de investigación y desarrollo de la empresa AT&T en EE.UU., dieron a conocer la primera célula que obtenía energía eléctrica directamente de la luz solar con eficiencia suficiente para hacer funcionar un radiotransistor. Es importante reseñar que este prototipo de célula de silicio sólo aprovechaba el 6% de la

energía que le llegaba del sol, pero fue suficiente para dar comienzo una nueva era en la obtención de las energías renovables.

Sin embargo, la verdadera revolución en la investigación de la energía solar llegaría, en la década de los 60, con el desarrollo de la exploración espacial. Los satélites espaciales necesitaban una fuente de energía autónoma y muy fiable que no supusiera un peso excesivo. La energía solar era la solución ideal. Desde entonces, y en gran parte gracias a la industria espacial la eficiencia de las células solares ha aumentado exponencialmente y la energía fotovoltaica se ha hecho imprescindible en aplicaciones como es el caso de los satélites en órbita o geoestacionarios, telescopios espaciales, etc.

Paralelamente, la utilización de la energía solar en la Tierra comenzó a desarrollarse de una forma más prosaica, con aplicaciones a pequeña escala como las calculadoras solares que ya no necesitaban pilas.

En los años 80 se comenzó a utilizar, sobre todo en los EE.UU., instalaciones solares como fuente de energía autónoma para casas apartadas, cuyos habitantes buscaban una alternativa no contaminante, así como un complemento para sus generadores diésel. Durante los años 90, los programas de promoción pública puestos en práctica en algunos países (Alemania, Japón) dieron otro empujón a la incipiente demanda.

En consecuencia, a través del desarrollo de la producción industrial en serie, comenzaron a bajar los costes de producción, de modo que estos sistemas también pudieron incrementar su presencia en otros sectores del mercado y competir con las soluciones energéticas existentes.

Hoy día la tecnología solar fotovoltaica tiene un futuro prometedor, ya que combina ventajas económicas y ambientales, dando respuesta de una manera tan adecuada al actual contexto social, económico y energético, que resulta difícil encontrar inconvenientes serios a su utilización habitual y masiva.

Por lo que respecta a nuestro país, se inicia la investigación fotovoltaica después de 1973, a raíz de la crisis del petróleo. En 1981, se funda la empresa Isofotón S.A., cuyas células salen a la venta en el mercado español en 1982. En la actualidad, los dos mayores fabricantes europeos son Isofotón S.A. y BP Solar, aunque en el sector operan 182 empresas, que emplean más de 5.000 personas. No obstante, el gobierno chino ha invertido grandiosos esfuerzos económicos y financieros en apostar por este sector, donde los costes de producción son mínimos, lo cual hace que muchas de las compañías europeas y americanas hayan desplazado sus líneas de fabricación al continente asiático.



### 3.1.1. Situación actual y futura de la Energía Solar Fotovoltaica

Las instalaciones de energía solar fotovoltaica constituyen una de los sistemas de generación eléctrica más demandados en el mundo. Pueden implementarse con la finalidad de consumir la electricidad en el momento en que se genera, de almacenarla para consumirlo en otro momento, para inyectarlo a la red, etc. La rentabilidad de la inversión para la instalación dependerá de su finalidad así como el marco regulatorio de las tarifas de venta de energía. A continuación se muestran unos datos sobre el estado de la energía fotovoltaica:

1. La capacidad instalada de energía FV hasta el 2010 es de 40 GWp (17 GW más en comparación al año 2009). La energía fotovoltaica sigue siendo la fuente renovable con mayor crecimiento promedio anual entre los años 2005 y 2010 (49%). Sólo entre el 2009 y 2010 la capacidad instalada creció en 72%.

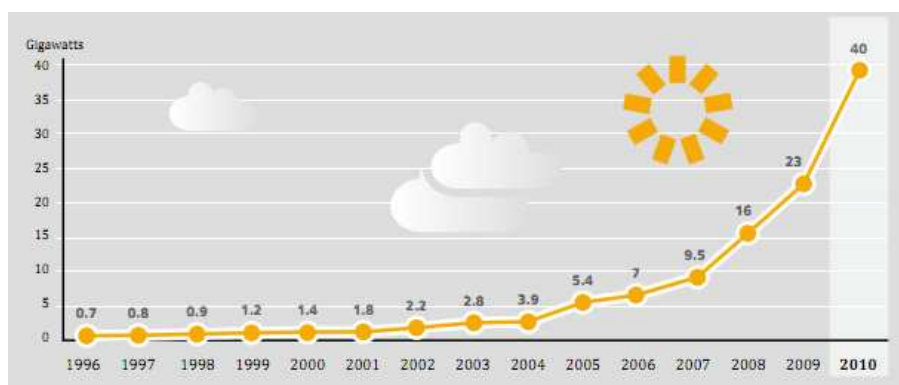


Figura 12 – Evolución de la capacidad FV instalada en el mundo

2. Alemania es el país que aumentó más su capacidad en FV durante el 2010, seguido de Italia, República Checa, Japón y Estados Unidos. Alemania también es el país con mayor capacidad instalada en FV (44%). Le siguen España (10%), Japón (9%), Italia (9%) y Estados Unidos (6%). Europa, como pueden ver en la siguiente figura, concentra más del 75% de capacidad instalada en el mundo de FV.

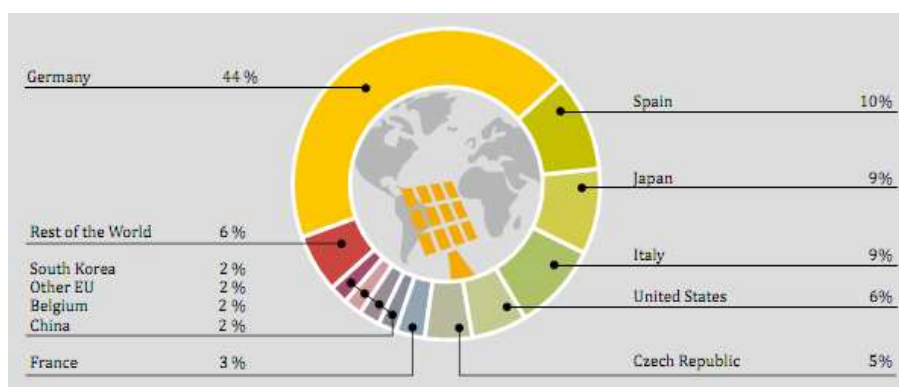


Figura 13 – Porcentaje de las instalaciones FV por países

3. A nivel mundial, la energía eólica es la fuente renovable que mayor capacidad instalada tiene para la producción de energía eléctrica en el mundo (sin contar la producción hidroeléctrica de gran escala). Cabe resaltar que el 2010 fue el primer año en que se instaló más potencia fotovoltaica que eólica en Europa. Aun así toda las fuentes renovables (sin contar a la hidroeléctrica de grande escala) sólo aportaron 3,3% de la producción mundial de electricidad.
4. En el 2010, fueron producidos cerca de 29 GW de células y 20 GW de módulos FV. El costo medio por módulo es de US\$ (dólares americanos) 1,3 a 1,8 por Wp. La tecnología de células cristalinas sigue dominando el mercado, pero hay una tendencia en el aumento de la producción de células de película delgada. Diez de los quince mayores productores de células se encuentran en Asia, siendo China y Taiwán responsables por casi 59% de la producción mundial de células en el 2010.
5. España es en la actualidad, 2013, uno de los primeros países con más potencia fotovoltaica del mundo, según la Agencia Internacional de la Energía, con una potencia acumulada instalada de 3.523 MW. Tan solo en 2008 la potencia instalada en España fue de unos 2.500 MW, debido al anuncio de cambio de regulación a la baja de las primas a la generación que finalmente se produjo en septiembre.
6. Alemania es en la actualidad el tercer fabricante mundial de paneles solares fotovoltaicos tras Japón, con cerca de 5 millones de metros cuadrados de paneles solares, aunque sólo representan el 0,03% de su producción energética total. La venta de paneles fotovoltaicos ha crecido en el mundo al ritmo anual del 20% en la década de los noventa. En la UE el crecimiento medio anual es del 30%.

A lo largo del año 2012 decayó de forma considerable los costes para las instalaciones fotovoltaicas, principalmente el coste de los paneles, los cuales presentan mayores niveles de eficiencia en la conversión de la energía solar en energía eléctrica. Pero, ¿a qué se debe esta caída en los precios de producción? La principal causa es supresión de las primas de numerosos estados, entre ellos España, lo cual no bonifica la venta de la producción o los excedentes. En esta situación, y en función de la tipología de la instalación, el estado pagaba el KW/h al precio del mercado al que se le añadía un prima hasta de 45 c€/KW/h. Esto quiere decir que en la actualidad la única forma de construir una instalación fotovoltaica económicamente viable en estos países donde se tomaron estas medidas es para autoconsumirla, lo cual permite un retorno de rentabilidad entorno a los 7 u 8 años. Todo esto queda reflejado en la siguiente legislación:

- Ley 54/1997, de 27 de Noviembre, del sector eléctrico. Establece la regulación del sector eléctrico.



- Real Decreto 1699/2011, de 18 de Noviembre. Para instalaciones de potencia igual o inferior a 100KW donde se regula la conexión a red para instalaciones de producción de energía eléctrica de pequeña potencia.
- REBT Real Decreto 842/2002, de 2 de Agosto, por el que se aprueba el reglamento electrotécnico para baja tensión (ITC-BT-40).
- Real Decreto 1955/2000, de 1 de Diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.

### 3.2. Efecto Fotovoltaico. La Célula Fotovoltaica

En este punto se tratarán los conceptos específicos sobre la energía solar fotovoltaica y se verán las partes que forman un sistema fotovoltaico, todo esto encaminado al concepto de farola solar. Pues bien, la tecnología fotovoltaica se basa en el fenómeno físico conocido como efecto fotovoltaico. Éste es la conversión directa, en un dispositivo llamado célula fotovoltaica, de radiación electromagnética en corriente eléctrica.

Los materiales semiconductores son el soporte de la conversión fotovoltaica. La semiconductividad, cuando no es intrínseca o propia del material debido a su peculiar estructura electrónica, puede provocarse impurificando (dopando) un cristal de determinados elementos químicos puros con algún otro elemento químico que tenga electrones de valencia en cantidad inferior o superior al que forma el cristal. Así se forman los semiconductores extrínsecos. Otros semiconductores extrínsecos son los formados por los óxidos o sales que no presentan una homogeneidad en la valencia química de los elementos que se combinan, es lo que ocurre con el óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), donde el cobre funciona como  $\text{Cu}^+$ , cuando en su estructura tiene intercalados átomos de  $\text{Cu}^{++}$ .

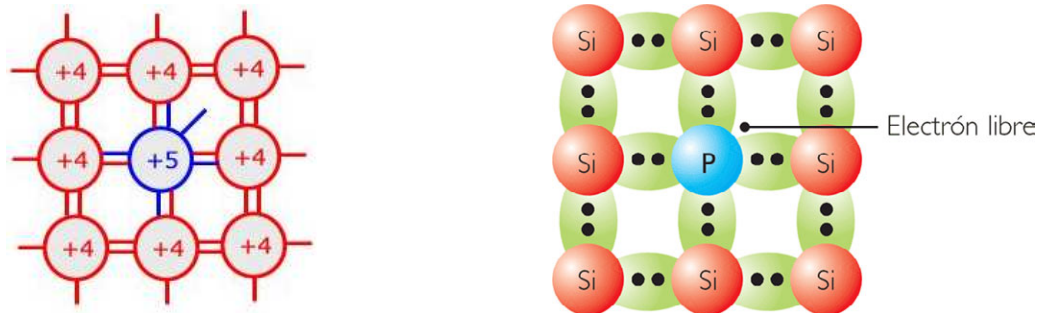
El silicio dopado es el semiconductor más usado y comercializado hoy por hoy en el campo de la energía solar fotovoltaica. El silicio tiene cuatro electrones de valencia preparados para formar enlace covalente con otros tanto átomos de silicio o con otro elemento químico compartiendo sus electrones. Si se sumerge un cristal de silicio en una atmósfera de fósforo, a determinadas condiciones de presión y temperatura, el fósforo se difunde por el cristal ocupando posiciones en la red cristalina y estableciendo enlaces con los átomos de silicio de su alrededor. Sin embargo, el fósforo tiene cinco electrones preparados para formar enlaces con los átomos del entorno, pero sólo encuentra próximos a cuatro, de manera que ocupa un lugar en la red cristalina del silicio, el quinto electrón, queda poco ligado (se dice que está en exceso), esto quiere decir que se sitúa en niveles energéticos altos, son los niveles donadores. La incidencia de radiación solar aporta la energía suficiente para desligar completamente a ese electrón y colocarlo en un nivel energético superior donde puede moverse



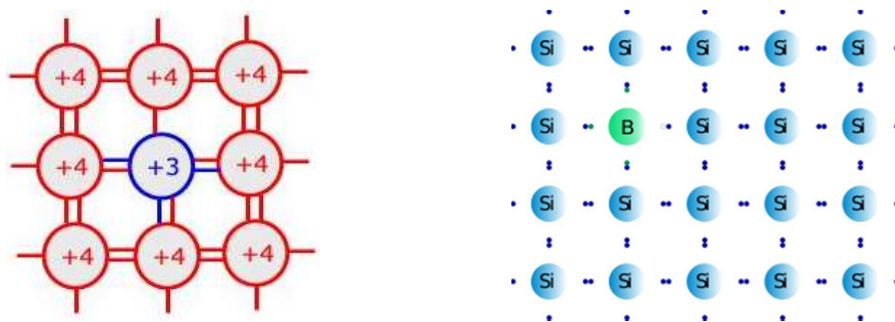


libremente por el material (salta a la banda de conducción) si se expone a un campo eléctrico, lo que implica que el silicio se hace conductor en éstas condiciones. Con esto, hemos descrito la formación de un *semiconductor tipo n o negativo*, es decir: con electrones con niveles energéticos donadores.

Cuando la atmósfera a la que exponemos el cristal de silicio es de un elemento químico como el boro, que tiene tres electrones de valencia preparados para formar enlace químico, en los lugares donde se ubica en átomo de boro aparece una carencia del cuarto electrón necesario para compartir con los cuatro átomos de silicio de su alrededor, se dice que hay un hueco. Este hueco está situado en los niveles de energía llamados aceptadores, porque aceptan ser ocupados por electrones. Se ha descrito la formación de un *semiconductor tipo p o positivo*, es decir con huecos aceptadores de electrones. Cuando un semiconductor tipo p se conecta a un circuito eléctrico y se le aplica un campo eléctrico aparece una conductividad debida al desplazamiento de los electrones de hueco en hueco en la dirección del polo positivo, o lo que viene a ser lo mismo, es como si los huecos se desplazaran en la dirección del polo negativo.



**Figura 14 – Semiconductor tipo n. La conducción se produce por la liberación de electrones y su salto a la banda energética de conducción por efecto de la incidencia de la radiación solar**

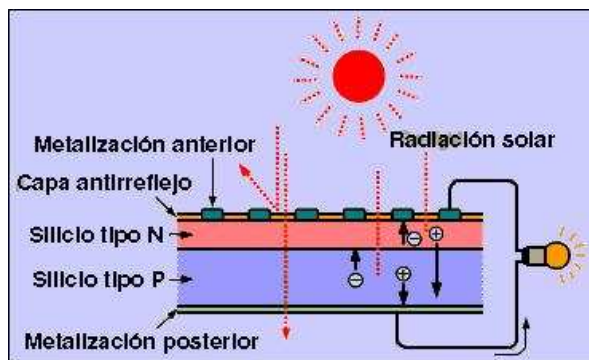


**Figura 15 – Semiconductor tipo p. La conducción se produce por el desplazamiento de los electrones de hueco en hueco**

Con esta idea, se puede entender que la célula fotovoltaica está formada por la “unión” de dos materiales semiconductores. Uno tipo n, con electrones en niveles de energía superiores poco ligados a los enlaces químicos entre átomos, y otro tipo p, con huecos o carencia de electrones en estos niveles. En la interfaz entre el semiconductor tipo p y el semiconductor tipo n (unión p-n, o unión diodo), aparece un polo positivo y un polo negativo. Se ha formado de este modo un campo eléctrico debido a la difusión



de electrones desde la zona n, donde están los electrones más libres, hasta la zona p donde existen los huecos. Lo anterior no quiere decir que la materia de un semiconductor tenga carga positiva o negativa según que estemos en la zona p o la n, la materia es neutra pues las cargas negativas de los electrones se compensan con las positivas de los protones de los núcleos atómicos, lo que sí aparece es una polaridad localizada en la interfaz de la unión p-n.



**Figura 16 – Funcionamiento de una célula fotovoltaica. Recorrido de los electrones, si se cierra externamente el circuito eléctrico, al incidir la luz en la cara n**

En la imagen anterior se puede entender que, cuando la radiación solar incide sobre la célula, los fotones con energía suficiente rompen el par electrón-hueco, dejando estos portadores libres, el campo eléctrico de la unión p-n separa estos portadores para evitar que se recombinen, llevando los electrones a la zona n y los huecos a la zona p, apareciendo de ese modo una intensidad de corriente neta que atraviesa la célula solar en el sentido de ese campo, es decir, de la zona p a la n. Si mediante una carga exterior se cierra el circuito, la corriente fotovoltaica generada sale de la célula hacia el circuito exterior por la zona p, atraviesa la carga y entra de nuevo por la zona n.

La radiación solar contiene fotones a todas las energías conforme a una distribución espectral (potencia en función de la longitud de onda) que va desde el infrarrojo (muy abundantes pero poco energéticos) hasta el ultravioleta (muy poco abundantes, 7%, pero muy energéticos), estando aproximadamente el 47% de la energía en la zona visible del espectro.

Fuera de la atmósfera, el espectro solar (masa de aire = 0), tiene una irradiancia normal a la superficie de  $1.367 \text{ W/m}^2$ , llamada Constante Solar. En su paso por la atmósfera hasta llegar a la superficie de la Tierra, este espectro se modifica por la influencia de la atmósfera que absorbe, dispersa y refleja parte de esa radiación de forma que al nivel del mar (masa de aire = 1,5) la irradiancia disminuye hasta los  $1.000 \text{ W/m}^2$ , aproximadamente, valor que sólo se alcanza en condiciones muy buenas.

La energía eléctrica generada en la célula fotovoltaica es corriente continua (C.C.). La tensión de trabajo (voltaje) depende de las características físico-químicas propias del material de construcción. El aumento de las temperaturas produce el efecto negativo de disminuir la tensión de trabajo. La tensión de trabajo de una célula

fotovoltaica de silicio es del orden de 0,5 voltios y la intensidad de corriente generado es, esencialmente, proporcional a la superficie expuesta al sol y la intensidad de radiación incidente sobre ella.

### 3.3. Sistemas Fotovoltaicos

Un sistema FV consiste en la integración de varios componentes, cada uno de ellos cumpliendo con una o más funciones específicas, a fin de que éste pueda suplir la demanda de energía eléctrica impuesta por el tipo de carga, usando como combustible la energía solar. La definición anterior deja claramente establecido que la carga eléctrica determina el tipo de componentes que deberán utilizarse en el sistema. La completa definición de la carga debe tener en cuenta tres características que la definen:

- Tipos de carga: las cargas a alimentar pueden ser en corriente continua (CC), corriente alterna (CA) y mixta (CC y CA). Cuando la carga tiene aparatos de CA, se necesitará incorporar al sistema un inversor, el cual se encarga de transformar el voltaje de CC, proporcionado por los paneles, en un voltaje de CA. Las pérdidas de energía en estos sistemas es mayor que la de los de CC.
- Valor Energético: el valor energético representa el total de energía que consumirá la carga dentro de un período determinado, generalmente un día. Para sistemas pequeños este valor estará dado en Wh/día. Para sistemas de mayor consumo en KWh/día.
- Régimen de uso: el régimen de uso responde a dos características: cuándo se usa la energía generada y la rapidez de su uso. Dependiendo de cuándo se usa la energía, se tendrá un régimen diurno, nocturno o mixto. La rapidez del consumo (energía por unidad de tiempo), determina el valor de la potencia máxima requerida por la carga:
  - Régimen nocturno: si el régimen de uso es exclusivamente nocturno, el sistema deberá almacenar energía durante el día. Esta necesidad se traduce en la incorporación de un banco de baterías, del cual se extraerá la energía demandada por la carga durante la noche. La presencia del banco de acumulación fuerza el uso de un control de carga y otros elementos auxiliares.
  - Régimen diurno: si el uso es exclusivamente diurno no se necesitará un banco de baterías. En este caso el sistema deberá ser capaz de entregar la máxima potencia requerida por las cargas.
  - Régimen mixto: Si el régimen de la carga es mixto, donde pueden haber consumos tanto en horario diurno como nocturno, parte de la energía producida vaya encaminada a cargar el banco de baterías y el resto deberá satisfacer la carga diurna. Ello implica



que la parte generadora deberá satisfacer dos requisitos durante la duración del día solar.

Básicamente se pueden distinguir dos aplicaciones de la energía solar fotovoltaica: los sistemas aislados o autónomos y los sistemas conectados a la red.

### 3.3.1. Sistemas conectados a la red

Las instalaciones fotovoltaicas en conexión a red vierten a la red eléctrica toda la energía generada en el momento en que es producida. No incluye ni se contempla ningún tipo de almacenamiento debido a que la filosofía de las instalaciones conectadas a red es inyectar el máximo de potencia posible. Los elementos funcionales básicos de toda instalación se muestran en el esquema de la Figura 17.

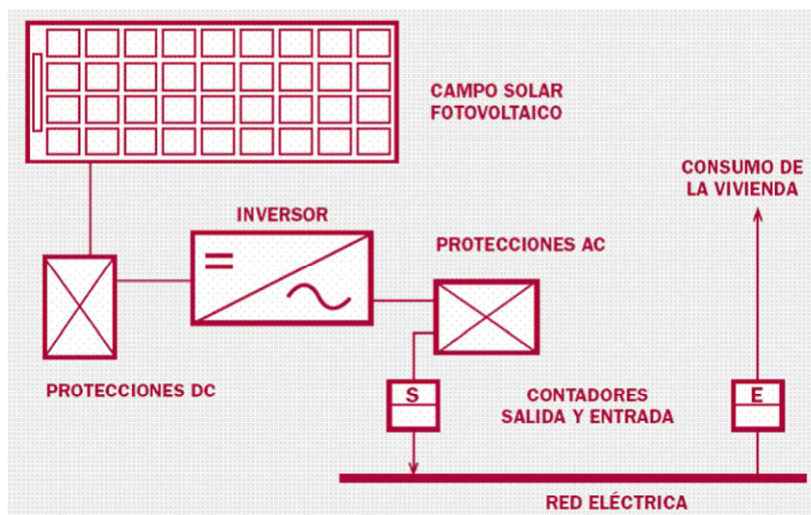


Figura 17 – Esquema básico de una instalación de conexión a la red

La potencia generada en continua debe ser transformada a corriente alterna, con las condiciones adecuadas que permitan una conexión segura a la red eléctrica según RD 1663/2000. Se disponen, por tanto, una serie de equipos de acondicionamiento y protección. La medida de la producción eléctrica en la cual se basa la facturación económica se realiza en un contador de salida que registra toda la producción fotovoltaica. Cuando existan consumos eléctricos en el mismo emplazamiento que la instalación fotovoltaica, éstos se situarán en circuitos independientes de los circuitos eléctricos de dicha instalación fotovoltaica y de sus equipos de medida. La medida de tales consumos se realizará con equipos propios e independientes, que servirán de base para su facturación. El contador de salida tendrá capacidad de medir en ambos sentidos, y, en su defecto, se conectará entre el contador de salida y el interruptor general un contador de entrada.

### 3.3.2. Sistemas autónomos o aislados de la red

Los sistemas fotovoltaicos no conectados a la red eléctrica se encargan del suministro eléctrico de instalaciones aisladas. El conjunto formado por generación más consumo debe ser autosuficiente y de elevada fiabilidad, es fundamental realizar una estimación adecuada de la demanda energética prevista. Cada tipo de aplicación presenta un perfil de consumo eléctrico diferente. Para algunas de ellas es posible conocer con antelación y con bastante precisión la demanda eléctrica a lo largo del año, bien porque su funcionamiento está programado o bien porque existen datos de campo de instalaciones similares. Como ejemplos significativos, se encuentran las instalaciones de telecomunicación, de telemedida, de señalización o la iluminación pública. En estos casos basta con conocer la potencia de los equipos y aplicar los perfiles horarios o diarios de consumo previstos. Existen otras aplicaciones, como los sistemas de emergencia (teléfonos, avisos, etc.), donde el consumo es nulo o muy bajo la mayor parte del tiempo, con picos de demanda puntuales cuando se requiere el uso del servicio. En estos casos la batería es capaz de suministrar la potencia puntual necesaria a partir de la energía que previamente se ha ido cargando desde el generador de forma más lenta. Por tanto, la diferencia fundamental entre las instalaciones conectadas a red y las autónomas es que las últimas necesitan incorporar acumuladores de energía para solventar la separación temporal entre generación y consumo, mientras que las otras inyectan la electricidad producida en la red en el mismo instante.

En la figura siguiente se muestra la configuración básica de una instalación fotovoltaica autónoma para electrificación, con los elementos principales: generador fotovoltaico, batería, regulador o controlador de carga y, si el consumo es en alterna, inversor.

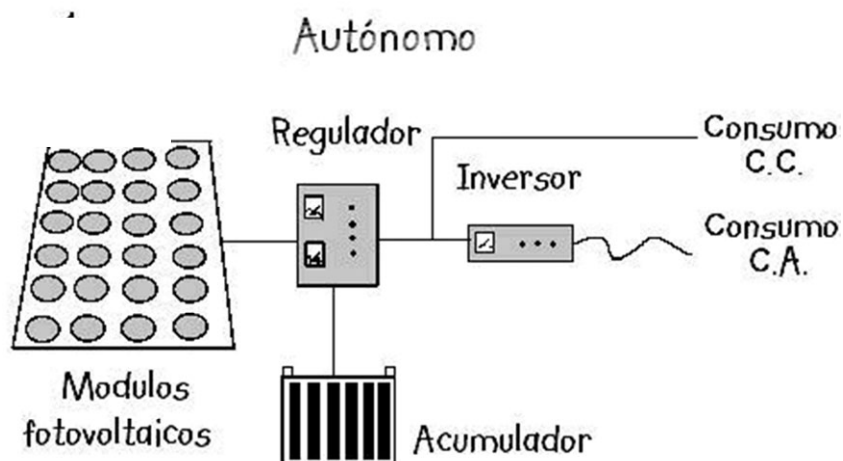


Figura 18 – Esquema básico de una instalación autónoma

### 3.3.3. Componentes de las Instalaciones Fotovoltaicas

La mayoría de los componentes son comunes a las instalaciones solares fotovoltaicas, si bien hay que distinguir la configuración. Para los casos de conexión a la red, éstos no requieren de la instalación de baterías para alimentar en horas donde no hay producción, sino que emplean la corriente procedente de la red eléctrica. Para el caso de las instalaciones autónomas donde se requiera satisfacer una demanda energética en horas distintas a las de producción, se requiere de la instalación de baterías, cuyo dimensionado dependerá de la aplicación.

A continuación se describen los componentes necesarios para estas instalaciones:

#### 3.3.3.1 El módulo fotovoltaico

El módulo fotovoltaico está formado por un conjunto de células fotovoltaicas interconectadas entre sí. Éstas se encapsulan y enmarcan mediante el sellado por la cara posterior con un encapsulante polimérico de EVA (etilenvinilacetato) y un recubrimiento, también plástico, el TEDLAR, y por la anterior con un vidrio templado, muy resistente al impacto, de superficie interior antirreflexiva y con bajo contenido en hierro para limitar su absorbancia, la superficie exterior del vidrio debe ser lisa para evitar la acumulación e incrustación de suciedad y para facilitar la limpieza por efecto de la lluvia, el marco que le da rigidez al conjunto es de aluminio anodizado, y, en ocasiones, lacado. La hermeticidad del módulo es esencial para impedir la penetración de los agentes atmosféricos que favorecería la corrosión y deterioro de los contactos metálicos. En el marco o en la lámina de TEDLAR se fija la caja de conexiones con tapa estanca que contiene a los bornes positivo y negativo. En la caja de conexiones se incorporan también unos diodos de derivación para el caso en el que se produzcan sombros parciales de una o varias células en el módulo.

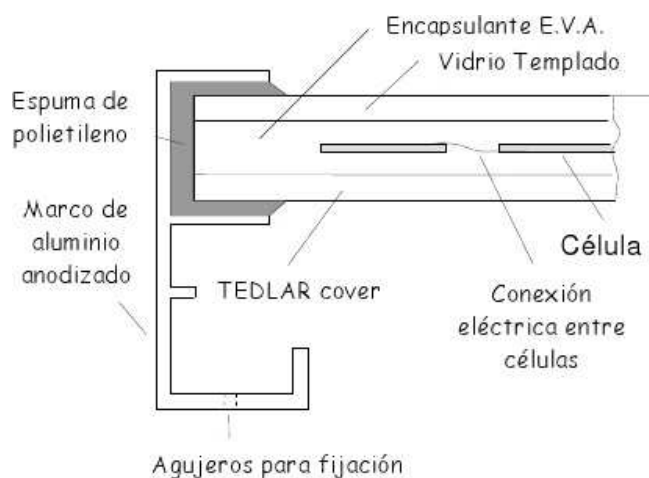


Figura 19 – Componentes de un módulo fotovoltaico

Para conseguir tensiones de trabajo más operativas que los 0,5V se necesitan conectar en serie entre 30 y 36 células con el fin de llegar a tensiones del orden de 20V en C.C. Sin embargo, se habla de una tensión nominal por panel o módulo fotovoltaico de 12V. El exceso de tensión se requiere para:

1. Compensar las caídas de tensión en los conductores.
2. Compensar las caídas de tensión en las cargas o aparatos de consumo.
3. Poder cargar las baterías de 12V nominales, ya que éstas requieren llegar hasta tensiones de carga del orden de 14,5V.
4. Compensar las pérdidas de tensión entre bornes del panel debido al aumento de la temperatura por exposición a la radiación solar.

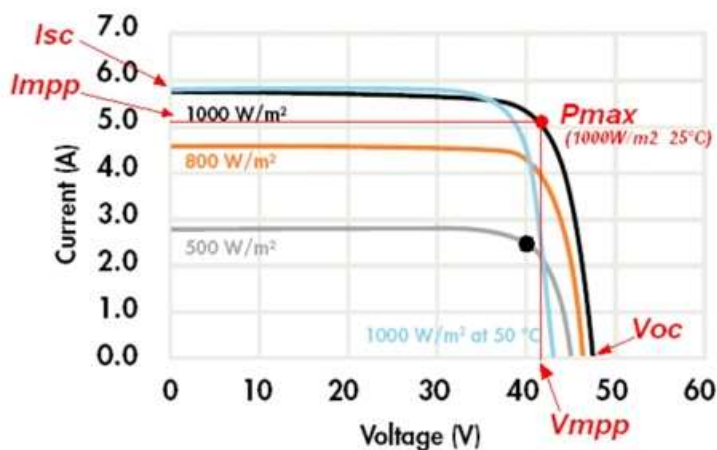


Figura 20 – Curva I-V de funcionamiento un módulo fotovoltaico. Se observan los efectos de la variación de la temperatura y de la radiación incidente

Una de las características esenciales de los módulos fotovoltaicos es su curva de trabajo I-V (intensidad-tensión). Los valores de tensión y corriente del módulo dependen de la insolación, de la temperatura de la célula, de la masa de aire que atraviese la radiación solar, y por supuesto de la resistencia óhmica de la carga conectada. Para poder comparar unos módulos con otros se homogenizan las condiciones de medida de los valores de V e I. Las condiciones estándar de comprobación corresponden a una luz solar incidente con una intensidad de 1.000 W/m<sup>2</sup>, una temperatura de célula de 25°C y una distribución espectral correspondiente al de la radiación solar cuando atraviesa una MA 1,5 (masa de aire = 1,5), esto quiere decir que el rayo solar ha recorrido desde el momento en el que penetra en la atmósfera hasta incidir en la célula una distancia 1,5 veces mayor que la que recorrería si su trayectoria fuera perpendicular al plano terrestre. En la curva I-V podemos definir los siguientes valores típicos:

- Tensión de circuito abierto ( $V_{CA}$ ): es la tensión en voltios medida entre bornes con un voltímetro cuando no hay conectado ningún consumo, la intensidad que circula es nula.



- Intensidad de cortocircuito ( $i_{cc}$ ): es la intensidad en amperios que se genera en el panel cuando no hay conectado ningún consumo y se cortocircuitan sus bornes con un amperímetro, el valor de la tensión entre bornes es cero.

Como se sabe, la potencia eléctrica de un generador de corriente continua se mide en vatios (W), y se define como:

$$P = V \cdot I$$

Así se tiene:

- Potencia pico ( $P_{pM}$ ): es la potencia máxima en vatios que puede generar un módulo en las condiciones estándar de radiación incidente.
- Intensidad pico ( $i_{pM}$ ) y tensión pico ( $v_{pM}$ ): son el valor de la intensidad y la tensión que hacen que la potencia sea máxima en las condiciones estándar.

Por otro lado, se ha comentado anteriormente la disposición de unos diodos en la caja de conexiones del módulo. Pues bien, estos diodos llamados de *by-pass* evitan que, en caso de recibir un sombreado parcial, la célula o células sombreadas se comporten como disipadores de en forma de calor de la potencia eléctrica generada por el resto de células iluminadas, ya que si la temperatura de la célula es muy elevada pueden producirse daños irreparables en el módulo. La corriente generada por el resto de células circula por el diodo de *by-pass* que en las circunstancias descritas se ha polarizado positivamente dejando pasar la corriente.

Con todo esto, los fabricantes suelen garantizar los módulos por períodos de hasta 10 años trabajando en condiciones del 0 al 100% de humedad relativa y temperaturas del orden de -50°C hasta +90°C. La eficiencia energética de conversión queda garantizada admitiendo que los módulos no pierden el 10% de rendimiento en 20 años. En cualquier caso, se verá que es evidente que el módulo en su vida útil devuelve sobradamente la energía que se invirtió en su fabricación. Existe un mercado en expansión, principalmente en zonas aisladas de la red eléctrica, dada la buena evolución en cuanto a fiabilidad y prestaciones de todos los componentes de los sistemas fotovoltaicos, que hace que esta tecnología supere en términos de garantía, comodidad y mínimo mantenimiento a los grupos electrógenos, que son, de momento, la alternativa más convencional para el suministro eléctrico en lugares remotos.

Finalmente, es importante tener en cuenta un idea de los tipos de paneles fotovoltaicos normalmente comercializados. Suelen estar compuestos por células fotovoltaicas de silicio monocristalino o policristalino. La diferencia entre una y otra radica en el procedimiento de fabricación.

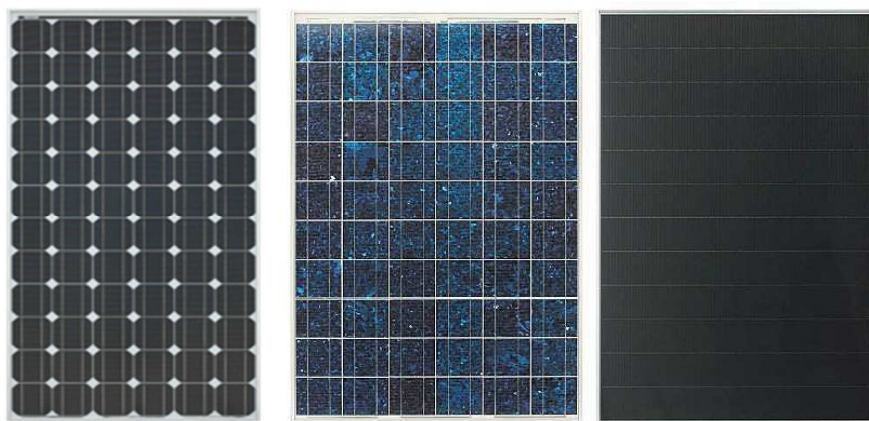
Las células de silicio monocristalino se obtienen a partir de silicio muy puro, que se refunde en un crisol junto con una pequeña proporción de boro. Una vez que el



material se encuentra en estado líquido se le introduce una varilla con un "cristal germen" de silicio, que se va haciendo recrecer con nuevos átomos procedentes del líquido, que quedan ordenados siguiendo la estructura del cristal. De esta forma se obtiene una monocristal dopado, que luego se corta en obleas de aproximadamente 3 décimas de milímetro de grosor. Estas obleas se introducen después en hornos especiales, dentro de los cuales se difunden átomos de fósforo que se depositan sobre una cara y alcanzan una cierta profundidad en su superficie. Posteriormente, y antes de realizar la serigrafía para las interconexiones superficiales, se recubren con un tratamiento antirreflexivo de bióxido de titanio o zirconio.

En las células policristalinas, en lugar de partir de un monocristal, se deja solidificar lentamente sobre un molde la pasta de silicio, con lo cual se obtiene un sólido formado por muchos pequeños cristales de silicio, que pueden cortarse luego en finas obleas policristalinas.

Además de éstos, existen otros paneles solares conocidos como silicio amorfo (a-Si), que se forman mediante el depósito de diferentes tipos de silicio tratado sobre un sustrato de vidrio. En primer lugar, un óxido conductor transparente (TCO) se aplica a un sustrato de vidrio seguido de un trazado con láser para establecer los límites de las celdas. A continuación, las capas silicio tipo p-i-n, se depositan en el TCO. Esta capas tipo p-i-n permiten que los fotones actúen para excitar a los pares electrón-hueco. Las capas de silicio son nuevamente trazadas y, finalmente, se incorporan los contactos que conectan las celdas recién formadas. Esta tecnología utiliza silicio de menor calidad y su eficiencia disminuye con el aumento de la temperatura. Está disponible en formato de módulos, tiene baja eficiencia pero a la vez, menor costo.



**Figura 21 – Tipos de módulos en función de células fotovoltaicas. Monocristalino, policristalino y silicio amorfo respectivamente**



### 3.3.3.2 Acumuladores electroquímicos (baterías)

Cuando se usa la energía procedente de la radiación solar para aplicaciones eléctricas, donde los procesos de consumo suelen diferir en el tiempo del proceso de captación, se hace necesario el almacenamiento de energía. El objetivo es disminuir en lo posible la dependencia del carácter cíclico y de los factores climáticos, que hacen que la radiación solar no se presente con una constancia temporal. Los ciclos día-noche, los períodos con días nublados, los meses de poca insolación, y la necesidad de suministrar consumos puntuales de elevada potencia y corta duración, nos suele obligar a prever de sistemas de acumulación de energía potencial. En el caso de la energía fotovoltaica se usan, en general, acumuladores electroquímicos (baterías).

Los acumuladores se dividen en primarios o secundarios. Los acumuladores primarios son los que después de suministrar una determinada cantidad de corriente no pueden regenerarse haciendo pasar una corriente eléctrica en dirección opuesta al sentido de la descarga. Los acumuladores secundarios son los que pueden regenerarse después de una descarga haciendo pasar a través de ellos una corriente eléctrica generada en el exterior. Éstos últimos son los que interesan desde el punto de vista de las instalaciones fotovoltaicas.

Pues bien, las baterías (formados por uno o varios elementos interconectados entre sí) convierten la energía química en energía eléctrica mediante dos electrodos de distinto material aislados eléctricamente uno del otro y “sumergidos” en un electrolito que hace de conductor iónico. Este electrolito puede ser líquido, sólido o tener forma de gel, pero normalmente es una solución acuosa. Cuando la batería es recargable, el proceso químico es reversible, y la energía eléctrica inyectada puede convertirse en energía química y almacenarse de ese modo.

Las propiedades de la batería que se elija para un sistema fotovoltaico influyen de manera muy importante en el diseño de algunos elementos de la instalación, por lo que hay que prestar especial atención a las características más convenientes para las condiciones del sistema a alimentar, tales como los tipos de cargas para las que se destina, la potencia total y los ciclos de consumo previstos, entre otros factores. Así pues, el abanico comercial disponible de posibles acumuladores de energía es grande, pero en la actualidad, los acumuladores más utilizados en los montajes fotovoltaicos son los llamados de *ciclo profundo* (a este respecto es muy importante conocer que no se deben usar baterías comunes de automoción, pues no están diseñadas para este propósito).

Los acumuladores de ciclo profundo para los sistemas fotovoltaicos están diseñados para ser descargados lentamente durante muchas horas, sin ser recargados completamente por varios días o semanas, sin que por ello sufran daños, ni se reduzca su vida útil.

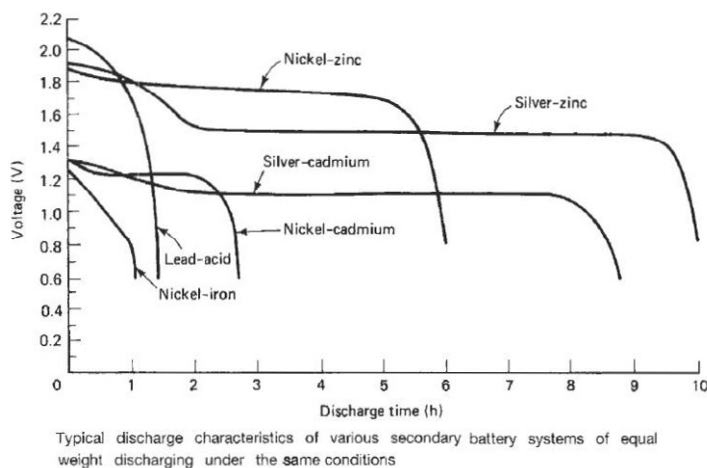




**Figura 22 – Ejemplo de acumulador ciclo profundo comercial para aplicaciones fotovoltaicas**

En este sentido las baterías de plomo/ácido son una de las más empleadas en este campo. De esta manera, veremos las características eléctricas más importantes de este tipo de acumuladores:

1. Voltaje: los módulos fotovoltaicos trabajan, normalmente, con tensión nominal de 12V, por lo que las baterías de acumuladores deben trabajar con tensiones nominales de 12 V o múltiplos enteros de la misma (24, 36, 48...), los elementos (vasos) de una batería Pb/ácido tienen tensiones de entre 2,04 y 2,09 V por elemento, lo que supone para un conjunto de 6 vasos conectados en serie una tensión de 12,24 V a 12,54 V. Durante la descarga se consume electrolito disminuyendo el voltaje y la densidad. La estabilidad en la tensión durante el proceso de descarga es un factor de calidad de una batería. Dependiendo de la intensidad con la que se produzca la descarga la tensión se mantiene con un leve descenso durante más o menos tiempo, pero llega un momento en que comienza a caer bruscamente, se dice que se ha llegado a la tensión de corte. Para este tipo de baterías, esta tensión oscila entre 1,7 y 1,9 V/elemento, según el régimen de descarga. La tensión de corte es aquella a la que se producen fenómenos no reversibles.



**Figura 23 – Variación de la tensión con el tiempo según el régimen de descarga y tipo de batería**

2. Intensidad de corriente: las baterías estacionarias deben suministrar intensidad durante tiempos más prolongados que las de arranque, por este motivo deben estar diseñadas de manera diferente, pues las de arranque suministran grandes intensidades en segundos. La capacidad de suministrar intensidad está relacionada con la porosidad de los electrodos y la concentración de electrolito. No obstante, para descargas largas en el compromiso entre resistencia y a la deformación del electrodo y su porosidad debe primar la resistencia a la deformación, mientras que para descargas intensas debe primar mayor porosidad. Por otro lado, mientras que para las baterías de arranque la densidad cuando están completamente cargadas es de  $1,28 \text{ g/cm}^3$ , para las estacionarias es de  $1,24 \text{ g/cm}^3$ .
3. Capacidad: la capacidad de una batería es la cantidad de carga que se puede extraer de la misma sin afectar a la tensión de manera grave. Esta capacidad se mide en Amperios hora (Ah). Una batería es como un depósito de energía de volumen variable, de manera que este volumen disminuye si se vacía muy rápido y es mayor si la descarga se hace más lentamente. La energía que extraemos de una batería depende de la intensidad de descarga y será mayor si esta intensidad es pequeña. Cuando en un etiquetado vemos la capacidad expresada en Ah debemos preguntarnos el número de horas en que se ha producido la descarga, normalmente para baterías de arranque este valor está estandarizado en 20 horas, mientras que para baterías fotovoltaicas el estándar de comparación es de 100 horas. Por tanto, a la hora de dimensionar una batería deberemos tener en cuenta la profundidad de descarga diaria para aumentar su vida útil y la profundidad de descarga máxima para no entrar en procesos irreversibles que impidan su completa recuperación durante la carga.

4. Ciclos de vida: las baterías de las instalaciones fotovoltaicas están sometidas a ciclos de carga/descarga que pueden ser diarios, semanales e incluso estacionales. La vida útil del acumulador depende de la periodicidad de los ciclajes y de su profundidad, es decir, de la cantidad de carga que se le extraiga en cada descarga. Las baterías de Pb/ácido no deben ser descargadas a diario más del 20% de su capacidad nominal dada para 100 horas, descargas diarias del 10% de su capacidad nominal alargan enormemente su vida útil. Ocasionalmente pueden llegar a descargarse el 70% siempre que no se mantengan en este estado mucho tiempo, ya que el sulfato de plomo formado durante la descarga en la superficie de los electrodos se “envejece” y se vuelve difícilmente soluble durante el proceso de carga. En cualquier caso, cuando una batería se descarga lo mejor es llevarlo a su estado de máxima carga lo antes posible.

En los proyectos y posteriores realizaciones de instalaciones de baterías de acumuladores se debe cumplir la normativa establecida en el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión. Como norma general, en lo referente a protecciones eléctricas, los dos polos de la batería estarán aislados de tierra. Las protecciones mínimas que deberán ser previstas son:

- A la salida de la batería de acumuladores y antes de las barras de distribución, habrán de instalarse cartuchos fusibles calibrados o un interruptor automático.
- Sobre las barras de distribución se instalará un detector de tierras que, como mínimo, facilite una alarma preventiva en caso de una eventual puesta a tierra de cualquier polo.
- Todos los circuitos que alimentan las distintas cargas deben ir equipados con fusibles calibrados o con interruptores automático.
- Conviene instalar un dispositivo detector que indique la falta de alimentación a la batería.

Asimismo, se dispone de un listado de normas UNE y EN donde se describen las características y ensayos de algunas de las baterías estacionarias de aplicación a las instalaciones eléctricas.

### 3.3.3.3 Regulador de carga

Los hilos positivo y negativo del generador fotovoltaico se conectan a este aparato electrónico que suministra la tensión y la intensidad de corriente que debe llegar a la batería según el estado de carga a que ésta se encuentre. Las maniobras esenciales que debe hacer un regulador están encaminadas a la protección contra sobrecargas,



interrumpiendo la corriente de carga una vez que ésta se haya completado, y la protección contra descargas excesivas, interrumpiendo el suministro de corriente al consumo ante una bajada de tensión. Es lo que se llama protección por sobretensión y protección por subtensión. Un buen regulador debe ajustar la tensión a la que debe finalizar la carga en función de la temperatura ambiente y de la tensión suministrada por el campo de paneles (régimen de carga). De igual modo debe ajustar la tensión de corte por baja carga según la intensidad de descarga y la temperatura ambiente. Es conveniente que el regulador mantenga a la batería en flotación, esto es, que suministre pequeñas corrientes de carga cuando la tensión baja, sin consumo, hasta un valor umbral que suele considerarse 2,3 V/elemento para 25°C, de este modo se compensa la autodescarga y se mantiene la batería permanentemente en estado de máxima carga en los momentos o días que no hay consumo; el mantenimiento en flotación alarga la vida de la batería. Los diferentes estados del sistema se pueden indicar mediante leds luminosos, o, para los casos de riesgo, por alarmas sonoras. Los reguladores pueden ser tipo paralelo o tipo serie. En la regulación en paralelo, una vez completada la carga, la energía producida en los paneles se disipa a través de una resistencia, es válida para pequeños sistemas. La regulación serie interrumpe el paso de la corriente a la batería en el momento en que se ha finalizado la carga y deja los paneles en circuito abierto, es el tipo de regulación más habitual. Las variables eléctricas del sistema que pueden interesar conocer son: la tensión de la batería, la intensidad de carga, intensidad de descarga, la energía consumida y la suministrada por los paneles.



Figura 24 – Regulador de carga de baterías

#### 3.3.3.4 Inversor o Convertidor CC/CA

La corriente generada por el campo de paneles y suministrada por las baterías es continua, y aunque existe un mercado especializado en aparatos que funcionan en CC a 12, 24 e incluso 48 V, el precio de los mismos y la dificultad, en ocasiones, de encontrar repuestos hace recomendable el replantearse la implementación de un inversor que transforme la CC en CA a 220V y 50Hz, que son características de la corriente suministrada por las compañías a nuestro hogar. Los convertidores más habituales en la

actualidad son los estáticos (electrónico), ya que se puede convertir la CC a CA incorporando en el eje un motor de CC con un alternador y tendríamos un convertidor dinámico. El tipo de onda suministrada por el inversor puede ser de más o menos calidad en función del modelo, la onda puede ser cuadrada, cuadrada modificada o senoidal pura. Los convertidores deben estar provistos de protección contra inversión de polaridad en la entrada, contra sobrecargas (conexión de consumos de más potencia que la que es capaz de suministrar el inversor). Por otro lado, es conveniente que si entran en alguna situación de desconexión vuelvan a rearmarse en el momento que se restablezcan las condiciones de diseño. La calidad de un convertidor viene dada también por su eficiencia energética. El rendimiento de un convertidor se hace máximo al trabajar en las condiciones de potencia máxima para las que ha sido diseñado y éste debe estar como mínimo por encima del 80%, los convertidores suministrados por las empresas especializadas en productos fotovoltaicos presentan rendimientos a potencia nominal superiores al 90%.

Al igual que sucede con las baterías, existen unos requisitos de seguridad que son necesario cumplir para su correcto funcionamiento tanto para las instalaciones conectadas a la red como para las aisladas.



Figura 25 – Ejemplo de inversores comúnmente empleados

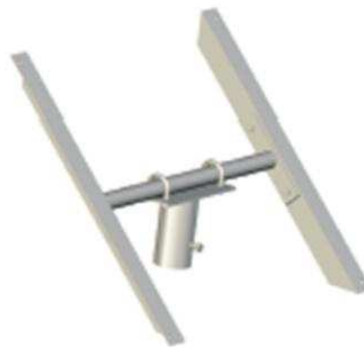
### 3.3.3.5 Estructura soporte

Los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino más comunes en aplicaciones en conexión a red tienen un peso entre los 12kg y los casi 50kg, dependiendo de su tamaño/potencia (desde 120Wp hasta más de 300Wp). Sus dimensiones varían desde aproximadamente 1m<sup>2</sup> hasta más de 2m<sup>2</sup> por unidad. La posición más habitual, y más sencilla, de los módulos es la fija, con orientación Sur en el hemisferio Norte y orientación Norte en el hemisferio Sur e inclinación en función de la latitud. En este tipo de diseños, los paneles, agrupados, se fijan a una estructura soporte que asegure la orientación e inclinación definida. Asimismo, debe garantizar una sujeción segura de los equipos y facilitar el montaje y el conexionado. Son estructuras que trabajan a la

intemperie y a larga duración. Los materiales más comunes son el acero galvanizado y el aluminio.



**Figura 26 – Estructura soporte para una central FV**



**Figura 27 – Modelo de estructura soporte para una columna o báculo**

En realidad, las estructuras soporte se realizan casi a medida de las características de los paneles, de sus dimensiones, y del número de ellos que se agrupen. El Pliego de Condiciones Técnicas de las Instalaciones Fotovoltaicas en Conexión a Red del IDAE incluye un conjunto de requisitos para la estructura soporte que se tendrá en cuenta en el proceso de fabricación e instalación.



## 4. TECNOLOGÍA DE COMUNICACIONES Y RED DE SENSORES INALÁMBRICA

---

### 4.1. Sensores

Antes de comenzar el análisis, conviene tener presente la definición de sensor. Se puede entender como un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación para la cual ha sido diseñado ese sensor, y transformarlas en variables eléctricas. Las variables de instrumentación permiten la medida de magnitudes como: temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, movimiento, pH, etc. Una magnitud eléctrica puede ser una resistencia eléctrica (como en un detector de temperatura resistivo), una capacidad eléctrica (como en un sensor de humedad), una tensión eléctrica (como en un termopar), una corriente eléctrica (como en un fototransistor), etc. A partir de aquí, los sensores han ido evolucionando para adaptarse a las necesidades de las *Smart cities*, donde se pretende mejorar la eficiencia energética de los elementos de consumo así como obtener información en tiempo real del tráfico, condiciones atmosféricas, consumo eléctrico, funcionamiento de sistemas, etc.

En la actualidad, la mayoría de los dispositivos electrónicos cuentan con alguno de los sensores disponibles en el mercado, como los sensores de temperaturas en las estaciones meteorológicas, los acelerómetros en los móviles y en las tabletas, sensores de detección de movimiento, los sensores de infrarrojos en los sistemas de detección de intrusos, etc. Estos sensores, principalmente, actúan a modo de transductor, realizan medidas de una o varias variables del entorno para ser enviada y tratada por el procesador central, el cual se encuentra en el sistema o dispositivo electrónico. Ante estos dispositivos electrónicos con sensores incorporados, durante los últimos años están ganando fuerza un nuevo tipo de sensores que son independientes de un sistema electrónico concreto y que incorporan en un mismo dispositivo el transductor específico de las variables a medir, la fuente de energía que asegure la autonomía del dispositivo y el módulo de comunicaciones con capacidad de organizarse a sí mismo y de interconectarse de forma inalámbrica con otros nodos de semejantes características.

Como se ve, aquí entra en juego otro concepto que determina esta nueva tendencia en los dispositivos sensores: el sistema de comunicaciones inalámbrico. La comunicación inalámbrica o sin cables es aquella en la que los extremos de la comunicación (emisor/receptor) no se encuentran unidos por un medio de propagación físico, sino que se utiliza la modulación de ondas electromagnéticas a través del espacio. La tendencia a la movilidad y la ubicuidad hacen que cada vez sean más utilizados los sistemas inalámbricos, y el objetivo es ir evitando los cables en todo tipo de comunicación.





Por tanto, el resultado del despliegue de estos sensores con capacidad de comunicación inalámbrica son las Redes de Sensores Inalámbricas (procedente del inglés *Wireless Sensor Networks*, WSN), lo que ha supuesto una revolución tecnológica comparable, en algunos aspectos, a la aparición de internet.

## 4.2. Caracterización de las WSN

Las WSN están formados por dispositivos a los que se le denominan nodos o motas (del inglés *mote*). Se trata de unidades autónomas, capaces de realizar algún tipo de procesamiento, recopilación de la información sensorial, y la comunicación con otros nodos conectados en la red. Tienen la habilidad de medir un medio físico con gran detalle. Como se ha comentado, constan de un microprocesador, un sistema de alimentación (normalmente una batería), un radiotransceptor y un elemento sensor.

De esta forma, una WSN es un red de un número elevado de diminutos dispositivos (de ahí la denominación como mota) equipados con sensores con ciertas capacidades sensitivas y de comunicaciones inalámbrica para controlar y medir determinadas condiciones físico-ambientales, como temperatura, humedad, presión, sonido, etc., y que se encuentran distribuidos en una zona geográfica determinada.

Adicionalmente, los diferentes nodos pueden operar no solo como sensores, sino que gracias a sus capacidades de procesamiento y comunicación pueden funcionar como actuadores, esto es, que disponen de los mecanismos que le permiten activar procesos automatizados sobre sistemas externos bien siguiendo instrucciones remotas o a partir de decisiones tomadas de manera autónoma a partir de la información recogida por el propio sensor.

Una de las ventajas de las WSN es que tienen la capacidad de autorestauración, es decir, si un nodo no se encuentra disponible por avería, la propia red se encarga de buscar una nueva ruta para encaminar los paquetes de datos. De esta forma, la red sobrevivirá en su conjunto, aunque haya nodos individuales que pierdan potencia o se destruyan. Es una de las ideas con las que se han desarrollado este tipo de redes, que gozan de capacidades de autodiagnóstico, autoconfiguración, auto-organización, autorestauración y reparación para solventar los problemas que no eran posibles con otras tecnologías. Las redes de sensores se caracterizan por ser redes desatendidas (sin intervención humana), habitualmente construidas ad-hoc para resolver un problema específico (es decir, para ejecutar una única aplicación).

Las WSN permiten formar redes ad-hoc sin infraestructura física preestablecida ni administración central. La expresión ad-hoc hace referencia a una red en la que no hay un nodo central, sino que todos los dispositivos están en igualdad de condiciones. Es el modo más sencillo para crear una red, un tipo de red formada por un grupo de nodos móviles que forman una red temporal sin la ayuda de ninguna infraestructura externa. Para que esto se pueda llevar a la práctica es necesario que los nodos se puedan



ayudar mutuamente para conseguir un objetivo común: que cualquier paquete llegue a su destino aunque el destinatario no sea accesible directamente desde el origen. El protocolo de encaminamiento es el responsable de descubrir las rutas entre los nodos para hacer posible la comunicación.

Con estos conceptos, se puede vislumbrar las características principales con las que las WSN han sido diseñadas:

- Despliegue Ad-hoc y un número elevado de nodos sobre un área
- No se utiliza infraestructura de red. Una red de sensores no tiene necesidad alguna de infraestructura para poder operar, ya que sus nodos pueden actuar de emisores, receptores o *router*.
- Nodos con reducido consumo de energía y memoria. Estas redes funcionan con baterías y tienen una larga autonomía de funcionamiento.
- Pueden operar sin mantenimiento durante varios meses o años.
- Se utilizan tecnologías inalámbricas de corto alcance, el encaminamiento entre dos nodos sin visión directa se realiza mediante comunicaciones multisalto.
- Topología dinámica: nodos auto-configurables, tolerancia a fallos y presentan una elevada fiabilidad. Los nodos tienen recursos limitados y son propensos a fallos, de forma únicamente mediante una cooperación y coordinación real entre todos los nodos se puede lograr que el sistema funcione correctamente.
- Un nodo sensor emplea mecanismos de *broadcast* para comunicarse con su entorno, mientras que la mayoría de la redes ad-hoc están basadas en comunicaciones punto a punto.
- Coste muy bajo
- La tendencia de estos dispositivos es que cada vez se vayan disminuyendo su tamaño, pudiendo variar desde un micrómetro a un milímetro.
- Integración y compatibilidad con otras tecnologías.

#### 4.3. Elementos de una WSN

Los dispositivos sensores disponibles en el mercado han adoptado dos tendencias de desarrollo: una de ellas se basa en integrar todos los componentes (sensores, radiotransmisores, microcontroladores) en una sola placa y, la otra, una placa



para los transceptores con la capacidad para conectarlo a la placa del microcontrolador. En el primer caso, se obtiene un menor costo de producción y son robustos en entornos duros. En el segundo caso, se tienen modelos más flexibles, donde los nodos están formados por una placa de sensores y una mota (placa de procesador y transmisión/recepción de radio). Estos sensores se pueden comunicar con un *gateway*, el cual se puede conectar con otros ordenadores o redes.



Figura 28 – Elementos de una WSN

De forma común a ambas tendencias, los elementos que forman parte de una WSN son:

- Sensores: capaces de medir las condiciones recogiendo la información deseada en el lugar y la convierten en señales eléctricas.
- Nodos: dispositivos que recogen la información recibida por los sensores y la transmiten a otros nodos o a la estación base. A los nodos se les denomina también motas en el ámbito de la red de sensores. Éstos, integran, al menos, sensores, microcontrolador, conversor A/D y el chip para la comunicación radio.
- Pasarelas o *gateways* (puerta de enlace): elementos que conectan los nodos de la red de sensores a una red externa (red de datos).
- Estación base: consistente en un elemento que recoge todos los datos provenientes de la red de sensores. Suele tratarse de un ordenador común o un elemento que lo sustituya.

#### 4.3.1. Nodos sensores y actuadores

Un nodo sensor es un elemento computacional con capacidad de procesamiento, memoria interfaz de comunicaciones y el actuador tiene adicionalmente la posibilidad de tomar decisiones de forma autónoma. Presentan las siguientes características:

- Suelen estar limitados por el consumo energético, al estar usualmente alimentados por baterías, y limitados en memoria y capacidad de proceso ahorrar costes.
- Son autónomos y operan independientemente.
- Tienen una alta probabilidad de fallo, debido a las condiciones a las que se exponen y a su bajo coste.
- Deben incorporar medidas que permitan su adaptación al entorno.

El tamaño de un nodo puede variar, al igual que su coste, desde cientos de euros a unos pocos céntimos, dependiendo de la complejidad requerida. El tamaño y la limitación del consumo en los nodos sensores son los causantes de las limitaciones de recursos como la energía (<50 mW), la memoria (<1 Mbyte), la velocidad de cálculo (<500 MHz) y el ancho de banda (250 kbps). El microcontrolador interno del nodo, pueden realizar pequeños procesamientos de los datos con el objetivo de reducir el tráfico circulante por la red, de forma que sólo enviará los datos o las informaciones estrictamente necesarias.

Como se ve en las Figuras 29 y 30, se distinguen los siguientes bloques funcionales en un nodo:

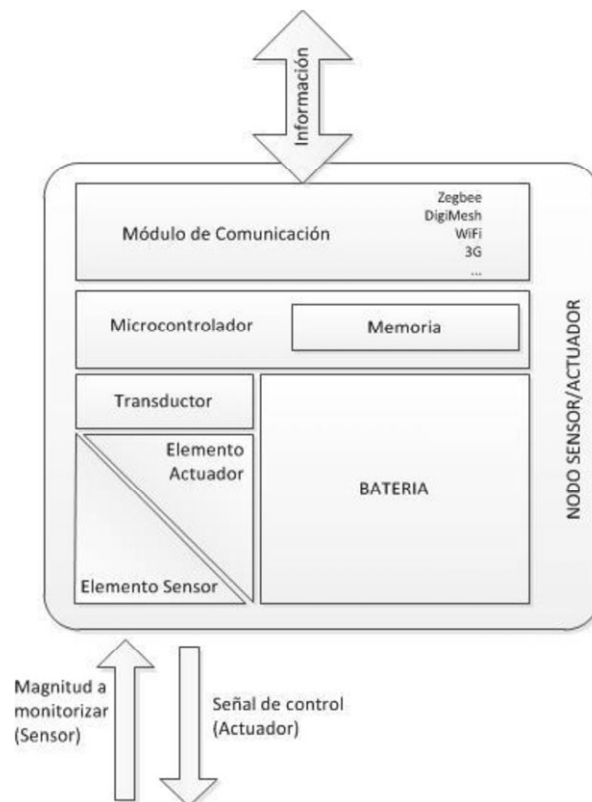


Figura 29 – Arquitectura de un nodo sensor

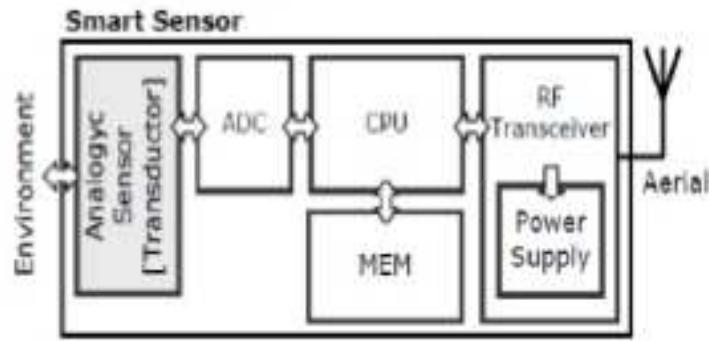


Figura 30 – Estructura interna de un sensor inalámbrico

- Bloque de proceso: suele ser un microcontrolador. Se encarga de gestionar todas las actividades del nodo desde la captura de los datos y su procesamiento, labores críticas de comunicación con otros nodos y la gestión eficiente del recurso energético.
- Bloque de memoria: el microcontrolador que se encarga del procesamiento de la información se apoya en la memoria para realizar correctamente su misión.
- Bloque de sensor: se trata de uno o varios sensores que se encuentran conectados a la unidad de proceso. En este módulo es donde se originan los datos que serán procesados mediante la medida de las variables del entorno.
- Bloque de comunicaciones inalámbricas: es el interfaz a través del cual el nodo interactúa y se comunica con los nodos vecinos.
- Bloque de alimentación: cada nodo debe estar equipado con su propia fuente energética. Suelen ser baterías y es el recurso que constituye la vida útil del nodo y uno de los puntos más importantes a tener en cuenta en el diseño de una red. El caso que se plantea, pretendemos constituir un modelo de farola inteligente perfectamente encuadrada en el desarrollo de las *smart cities* mediante convergencia de las energías renovables para alimentar el sistema de iluminación y, al mismo modo, alimentar un nodo sensor para realizar funciones como optimizar el consumo de energético de la farola y monitorizar condiciones ambientales. La finalidad última es, por tanto, mostrar la posibilidad de una farola inteligente totalmente autónoma.

## 4.4. Arquitectura de una WSN

La arquitectura de red empleada para implementar una WSN suelen ser de dos tipos:

### 4.4.1. Centralizada

En este tipo de configuración, los nodos se encargan de recoger información, tras lo que enviarán sus datos a la pasarela o *gateway* más cercano que dirigirá el tráfico de la red. El principal problema es la lentitud en los envíos de los paquetes de datos al tener pasar por un mismo punto.

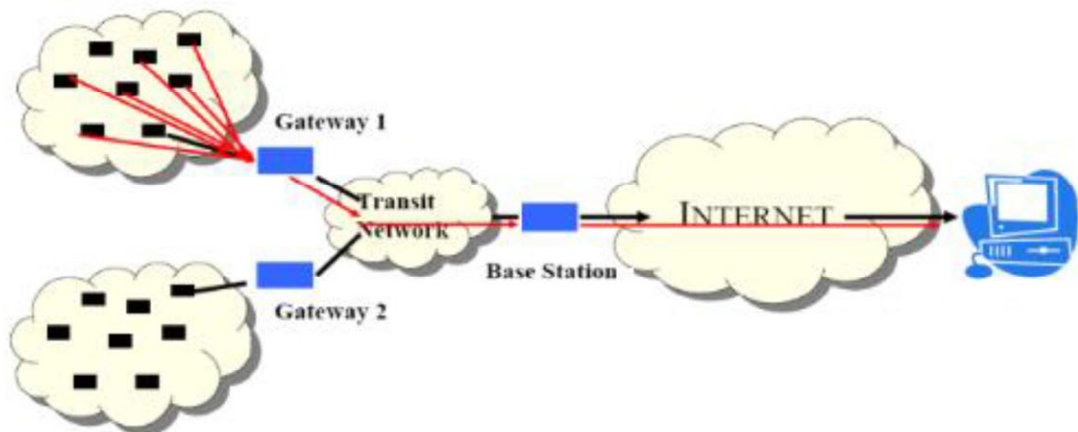


Figura 31 – Arquitectura centralizada en una WSN

### 4.4.2. Distribuida

Empleando una arquitectura distribuida, los nodos se comunican con aquellos que se encuentran a su alcance de forma que cooperan entre sí y obtienen una única respuesta que será enviada al coordinador del clúster, el cual se comunica con la estación base.

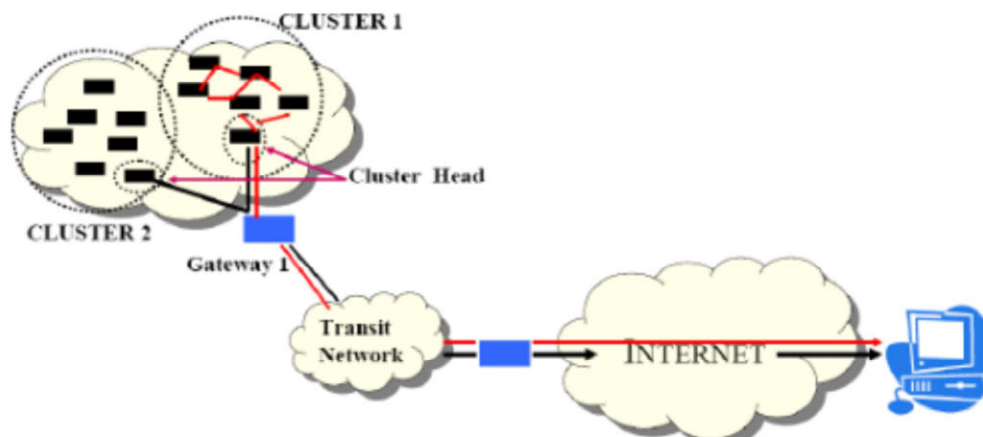


Figura 32 – Arquitectura distribuida en una WSN

## 4.5. Topología de una WSN

Existen varias topologías de red, las más empleadas son:

### 4.5.1. En estrella

En este caso se requiere un nodo coordinador del grupo de nodos que se encuentran conectados a él. Se llama *Personal Area Network* (PAN) y mantiene una comunicación bilateral con cada nodo. Dicho coordinador es el encargado de iniciar, terminar o redirigir la comunicación a través de la red. Aparte de esto, realiza la propia función que tenga asignada, por ejemplo, actuar como nodo central de recogida de datos.

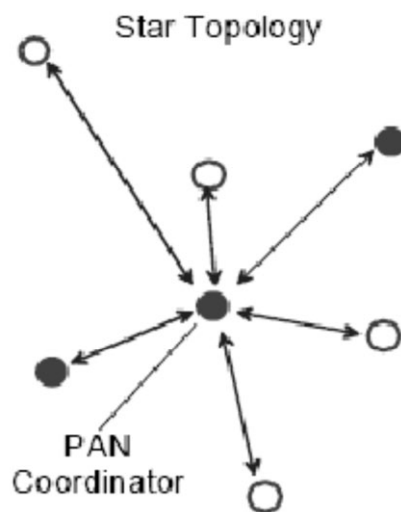


Figura 33 – Topología en estrella

### 4.5.2. De igual a igual

En esta topología cada nodo puede comunicarse con otros de la misma red que estén a su alcance. Conforman redes ad-hoc (redes sin infraestructura física preestablecida ni necesidad de un control central que coordine su actividad). Tienen la característica que pueden ser auto-organizativas, con restauración de caminos, con nodos que puedan trabajar como emisores o receptores y tener la capacidad de establecer caminos de comunicación entre nodos sin visibilidad directa y, modificar estos caminos si alguno de los nodos del encaminamiento falla, etc. Pero estas funciones han de ser establecidas por el protocolo de comunicaciones que se emplee entre los nodos. Con esta topología de red es posible crear estructuras más complejas como redes malladas en las que no existe una jerarquía entre los nodos.

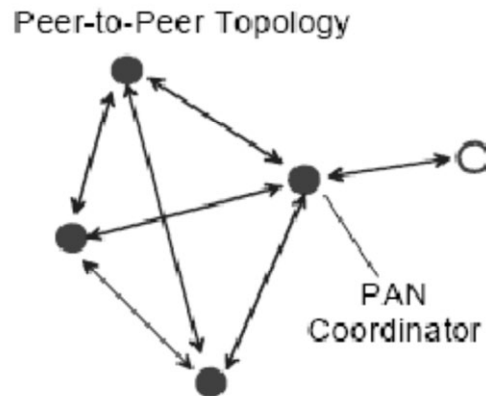


Figura 34 – Topología de igual a igual

## 4.6. Tipos de tecnologías inalámbricas

A continuación se estudian las tecnologías de comunicación inalámbricas de nivel físico y de enlace que pueden ser empleadas en redes de sensores con el fin de evaluar el sistema más conveniente para el diseño e integración del sistema que se propondrá más adelante:

### 4.6.1. Bluetooth

El estándar IEEE 802.15.1 o Bluetooth trabaja en la banda ISM (*Industrial Scientific & Medical*) a una frecuencia de 2,4 GHz con 79 canales de 1 MHz entre 2402 y 2480 MHz. Esto hace muy alta la probabilidad de interferencia debido la proximidad de redes 802.11, hornos microondas, mandos de garaje, etc. Para evitar en lo posible las interferencias, Bluetooth usa un sistema llamado *Frequency Hop Spread Spectrum* (FHSS). Dicho sistema realiza 1600 saltos de frecuencia por segundo entre los 79 canales radio. Es decir, divide la información en pequeños paquetes, los cuales se transmiten siguiendo una secuencia determinada a través de los 79 canales disponibles.

El rango de alcance de Bluetooth es de 10 metros con un consumo de 1 mW, aunque dicho rango puede alcanzar los 100 metros si aumentamos la potencia de transmisión hasta los 100 mW. La tasa de transmisión es de 1 Mbps cuando se utiliza modulación GFSK (*Gaussian Frequency Shift Key*). Aunque para versiones más avanzadas del estándar (Bluetooth 2.0) se pueden alcanzar velocidades de hasta 2 Mbps gracias a la combinación de GFSK con PSK (*Phase-Shift Keying*).

Bluetooth está basado en una arquitectura maestro-esclavo. En la que los dispositivos se organizan en celdas denominadas “piconets”, que pueden estar formadas de hasta un máximo de 8 nodos, de los cuales uno es el maestro, encargado de organizar



la comunicación entre los demás integrantes de la red o esclavos. Además, cuenta con cinco estados distintos de funcionamiento para reducir el consumo.

#### 4.6.2. WI-FI

Esta tecnología se basa en el estándar IEEE 802.11 y pretende ser la alternativa inalámbrica a las redes de área local (LAN).

Trabaja en la banda ISM y existen varios estándares Wi-Fi, los principales son:

- 802.11b: trabaja a 2,4 GHz, tiene un alcance de aproximadamente 100 metros con una tasa de transferencia de 11 Mbps. Su principal ventaja es el bajo coste de los dispositivos que lo implementan.
- 802.11a: trabaja a una frecuencia de 5 GHz y su tasa de transferencia puede alcanzar los 54 Mbps. Al ser una frecuencia menos usada, no se dan tantas interferencias. No obstante tiene un rango de unos 30 metros y el coste de los dispositivos es mayor que los de 802.11.
- 802.11g: trabaja a 2,4 GHz, compatible con 802.11b, puede alcanzar velocidades de hasta 54 Mbps en un rango de alcance de unos 100 metros. Por contra, su coste y consumo de potencia son mayores.
- 802.11n: incrementa significativamente la velocidad de transmisión hasta un máximo de 600 Mbps.

Existen dos tipos de elementos de red: AP (*Access Point*) y las estaciones. El primero está conectado a una red Ethernet y, el segundo se trata de estaciones inalámbricas, en general ordenadores personales, teléfonos móviles, entre otros, equipados con un interfaz de red inalámbrico (NIC: *Network Interface Card*).

Dependiendo de la forma de conectar los elementos de red anteriores se pueden definir diferentes configuraciones para las redes WLAN:

- Infraestructura: cada celda, o BSS (*Basic Service Set*), es el área de cobertura de un AP que forma parte de una red cableada. Los dispositivos inalámbricos que se encuentran dentro de la celda se conectan a la red o entre ellos mismos a través del AP.
- Ad hoc: en este caso dos o más dispositivos 802.11 se conectan directamente entre ellos sin tener que canalizar previamente la información a través de un AP. A esta configuración también se la conoce como “*peer to peer*”.



#### 4.6.3. Ultra-Wide Band

Basado en los trabajos del IEEE 802.15.3a, *Ultra-Wide Band* (UWB) es una tecnología en el rango de las PAN que pretende saciar la necesidad del intercambio de datos con una alta tasa de transferencia en distancias cortas, como puede el ejemplo de videocámaras digitales, sistemas home cinema, etc.

UWB hace uso de un espectro muy ancho de frecuencias: desde los 3,1 hasta los 10,6 GHz con un ancho de canal de 500 MHz. Pero, al contrario que Bluetooth y Wi-Fi, no realiza el envío de información de forma continua sino en determinados instantes temporales, utilizando gran parte de ese ancho de banda y emitiendo con menos potencia. Así, el consumo de los dispositivos basados en este estándar es relativamente bajo. Además esta tecnología es capaz de hacer uso de un mismo canal sin interferencias.

Con UWB se pueden alcanzar tasas de transmisión de 110 Mbps con un rango de alcance de 10 metros aproximadamente. Sin embargo, en su contra para que esta tecnología se consolide queda por resolver la poca distancia de transmisión, la contaminación electromagnética, la interoperabilidad, entre otros.

#### 4.6.4. Z-Wave

Z-Wave es un protocolo para comunicación inalámbrica diseñado para aplicaciones remotas en el hogar como iluminación, accesos, detectores de humo, etc., que opera en el rango de los 900 MHz perteneciente a la banda ISM, y tiene una cobertura de unos 30 metros. Permite una topología mallada o *mesh*, que admite en torno a los 232 dispositivos, en la que puede haber uno o varios coordinadores y donde la tasa de transmisión alcanza los 50 Kbps. Cada nodo permite enrutar información hacia otro lo que hace que el radio de cobertura crezca en relación con el de una sola unidad, lo que significa la existencia de ciertos nodos, llamados repetidores, no puedan dormir.

#### 4.6.5. Wibree – Bluetooth Ultra Low Energy

Wibree es una nueva tecnología digital de radio interoperable para pequeños dispositivos. Permite la comunicación entre dispositivos móviles, computadores y otros dispositivos más pequeños (de pila de botón). Está diseñada para que funcione con poca energía y a poca distancia, opera a una frecuencia de 2,4 GHz (ISM) y cuenta con una tasa de transferencia de 1 Mbps en la capa física. Además da soporte de seguridad utilizando el sistema de cifrado AES (*Advanced Encryption Standard*). Las principales características de WiBree son que tiene un consumo de energía durante la conexión ordinaria 10 veces menor que Bluetooth 2.1, y es 50 veces más rápido en las transferencias de datos. Wibree, tal y como está definido, no es compatible con los



actuales estándares Bluetooth. Desde junio de 2007, se le conoce como "*Bluetooth Low Energy Technology*" o "Bluetooth ULP" (*Ultra Low Power*).

#### 4.6.6. IEEE 802.15.4

La norma IEEE 802.15.4, implementa las capas física (PHY) y de control de acceso al medio (MAC: *Medium Access Control*). Esta tecnología está enmarcada dentro de un subgrupo de las redes de área personal, las LR-WPAN (*Low Rate WPAN*, baja velocidad de transmisión), y está orientada a la implementación de redes de sensores inalámbricos y actuadores.

Dentro de las características más importantes se puede destacar que alcanza tasas de transmisión de hasta 250 Kbps, en un rango de cobertura de entre 10 y 100 metros y que opera en las bandas ISM a las frecuencias de 2,4 GHz, 868 MHz (Europa) y, 915 MHz (Estados Unidos):

Banda RF	Rango de frecuencias (MHz)	Tasa de datos (Kbps)	Número de canal	Área geográfica
868 MHz	868,3	20	0 (1 canal)	Europa
915 MHz	902-928	40	1-10 (10 canales)	América, Australia
2400 MHz	2405-2480	250	11-26 (16 canales)	Todo el mundo

Tabla 2 – Bandas de frecuencias empleadas por el estándar IEEE802.15.4

Conviene destacar:

- Otra característica esencial es la optimización del consumo de los elementos que componen la red. Son los nodos finales (típicamente sensores o actuadores) los elementos con menor consumo, ya que permiten ser configurados de forma que permanezcan inactivos hasta que ocurra un determinado evento o tengan que enviar información. Este protocolo permite dos tipos de topologías en estrella y *peer to peer* en visión directa.
- Direccionamiento corto de 16 bits o extendido de 64 bits
- Asignación de intervalos de tiempo garantizados (GTS, *Guaranteed Time Slot*)
- Uso de CSMA-CA como técnica de acceso al medio.
- Mecanismos de asentimiento para garantizar la fiabilidad de las transmisiones.



- Control de potencia, e indicación de calidad del enlace (LQI12, *Link Quality Indicator*).

#### 4.6.6.1 Arquitectura del estándar IEEE 802.15.4

La arquitectura definida en el estándar IEEE 802.15.4 se divide en dos niveles: capa física y subcapa MAC (junto con la subcapa LLC). En la figura siguiente se observa el nivel de ejecución del estándar comparado con el modelo de capas OSI.



Figura 35 – Arquitectura IEEE 802.15.4 con modelo OSI

Similar a todos los estándares inalámbricos IEEE 802, como se muestra en la figura, el estándar IEEE 802.15.4 normaliza sólo las capas física o PHY y de control de acceso al medio o MAC. Por encima pueden ir otros protocolos como ZigBee, el cual se verá a continuación.

La capa física se encarga de interactuar con el medio físico de transmisión así como con la capa MAC. Esta capa provee dos servicios a la capa MAC: Servicio de Datos PHY, que habilita la transmisión y recepción de Unidades de Datos de Protocolo PHY (PPDU) a través del canal de radio; y el Servicio de Administración, el cual brinda mecanismos para el control y configuración de la interfaz de radio desde la capa MAC.

Las tareas de esta capa son:

- Activación y Desactivación del transceptor de radio.



- Detección del nivel de energía en el canal de trabajo.
- Brindar un Indicador de Calidad de Enlace (LQI, *Link Quality Indicator*) de los paquetes recibidos, basados en su nivel de potencia.
- Realizar la valoración de canal libre (CCA, *Clear Channel Assessment*), utilizado por la Sub-Capa MAC para el algoritmo CSMA/CA (Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones). Elegir el canal de frecuencia de trabajo.
- Transmisión a través del canal físico de los mensajes.

La capa MAC, una sub-capa de la capa de enlace, se encarga de brindar acceso a los canales físicos para todo tipo de comunicación. Como se puede ver, la capa de enlace está formada por la subcapa 802.2 LLC (*Logical Link Control*) y, la sub-capa MAC. 802.2 LLC es común en todos los estándares IEEE 802 y accede a la sub-capa MAC, sin embargo su explicación está fuera del alcance del estándar IEEE 802.15.4.

La sub-capa MAC ofrece los siguientes servicios a las capas superiores: Servicio de Datos MAC (MCPS, *MAC Common Part Layer*), el cual permite enviar y recibir datos a la siguiente capa superior; y el Servicio de Administración MAC (MLME, *MAC Layer management Entity*), que brinda mecanismos para el control y configuración de comunicaciones, interfaz de radio y creación de redes desde la siguiente capa superior.

Las tareas de esta capa son:

- En el caso de nodo coordinador, debe generar señales de sincronización, asociación/desasociación.
- Brindar diferentes servicios de seguridad.
- Utilizar el mecanismo CSMA/CA para el acceso al canal.
- Enviar tramas de acuse de recibo.
- Administrar el mecanismo de las ranuras de tiempo dedicadas.
- Administrar la asociación y desasociación de nodos en la red PAN.

#### 4.6.7. ZigBee

ZigBee es un estándar hardware y software que parte del estándar IEEE 802.15.4. Incluye especificaciones en múltiples niveles del modelo de referencia OSI, desde el modo de uso de la capa física y MAC, hasta perfiles de usuario, descubrimiento de topologías, seguridad, y mensajería a niveles de red y aplicación. Al igual que IEEE 802.15.4 trabaja en la banda ISM a 2,4 GHz, pero tiene una velocidad de transmisión menor.



Las características básicas de ZigBee son:

- Menor potencia y menor coste que otras WPAN (como Bluetooth).
- Potencia Tx típica 1 mW (hasta 10 mW en CE, hasta 100 mW en EEUU)
- Los nodos están gran parte del tiempo “dormidos” (Larga duración: 2 años).
- Rango alcance: 10-100 m, hasta 400 m con 10 mW.
- Bit-rate entre los 20 kB/s y 250 kB/s.
- Se permiten hasta un total de 65534 nodos/red.
- 3 bandas comunicación: 868 MHz, 915 MHz, 2,4 GHz.

#### 4.6.8. Comparativas entre tecnologías de redes inalámbricas

A continuación se realizará una comparativa entre las tecnologías anteriormente mencionadas que permitirá considerarla para la integración del modelo de farola que se estudia. Existen varias aplicaciones que se pueden integrar en las farolas en función de las necesidades. Si se pretende que haya una comunicación hay que tener en cuenta la distancia de separación entre nodos, los cuales se encontraran en las farolas. Aunque el sistema se alimentará autónomamente, se pretende un sistema con un bajo consumo de energía, aunque podrá recargarse la batería gracias a la instalación de uno o varios paneles solares. Además, el tráfico de datos no será elevado y no se producirá de forma continuada. Para esta red, se requiere que el nodo se encuentre operativo cuando haya que realizar alguna tarea, ya sea transmisión o recepción. Las aplicaciones de las que se habla es la de monitorizar condiciones ambientales o control de los niveles de iluminación en función del nivel de iluminación natural que se detecte, entre otras.

Con estas premisas, se procede al análisis sobre qué tecnología es la más conveniente. Las alternativas inalámbricas anteriormente mencionadas trabajan en la misma banda ISM a excepción de UWB que trabaja desde los 3,1 a los 10,6 GHz por su parte, Wi-Fi requiere una actividad casi ininterrumpida de los dispositivos en la red. Este estándar presenta una elevada tasa binaria, capaz de transmitir gran cantidad de datos entre dispositivos, lo que supone un gran consumo de energía. Por lo que Wi-Fi queda descartada por su alto consumo.

UWB, por su parte, aunque energéticamente podría ajustarse y proporciona una elevada tasa de transferencia, el radio de cobertura de en torno a 10 metros es pequeño. Esto unido a la escasa disponibilidad de dispositivos en el mercado hace que se descarte.



Bluetooth está diseñado para la transferencia de datos a distancias cortas. IEEE 802.15.4 tiene un consumo similar, pero menor consumo en el estado de espera. Esto es debido a que los dispositivos en redes Bluetooth deben dar información a la red frecuentemente para mantener la sincronización, así que no pueden ir fácilmente a modo de sueño. Además el tamaño de las piconets tiene un valor máximo de 8 nodos. No obstante su necesidades de establecer el pareado entre los nodos, dificulta su despliegue en redes de sensores. IEEE 802.15.4 en cambio, se trata de un protocolo cuya tasa de transmisión no supera los 250 Kbps, y con una cantidad de datos baja es más que suficiente. No precisa de gran capacidad de cómputo, ni de grandes potencias de transmisión. Precisamente el objetivo buscado. Zigbee por su parte, añade *overhead* por lo que la velocidad de transmisión bajará. Al contrario que 802.15.4 que permite la comunicación por visión directa, Zigbee enruta paquetes a través de nodos intermedios, es decir permite una topología mucho más compleja.

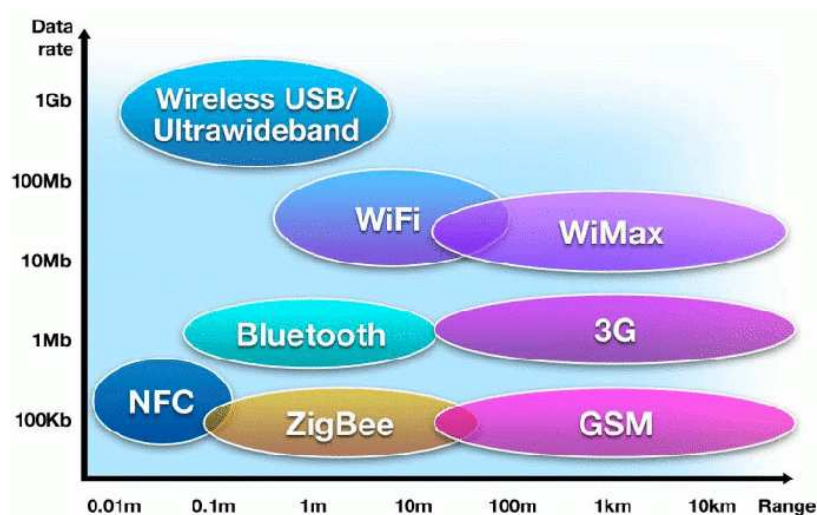


Figura 36 – Capacidades y rango de transmisión por tecnologías

Protocolo	802.15.4	Bluetooth	Wi-fi	UWB	Z-Wave	Wibree
Alcance	100 m	10 m	10-100 m	10 m	1-30 m	1-10 m
Banda de frecuencias	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4-5 GHz	3,1-10,6 GHz	900 MHz	2,4 GHz
Régimen binario	250Kbps	1Mbps	11,54,300Mbps	110Mbps	40Kbps	1Mbps
Consumo	1,8 mA en Tx 5.1 $\mu$ A en reposo	40 mA en Tx 0.2 mA en reposo	400 mA en Tx 20 mA en reposo	-	23 mA en Tx 3 uA en reposo	-

Tabla 3 – Tecnologías de transmisión por radio

Por tanto, si se desea disponer de una solución interoperable y escalable, es imprescindible elegir una tecnología abierta. De entre todas mencionadas anteriormente, resultan especialmente interesante IEEE 802.15.4 y, por tanto, ZigBee. Ambas se ajustan más al despliegue de redes o aplicaciones en las que no es necesaria una gran

velocidad de transmisión, pero sí es importante minimizar la complejidad, el consumo y el coste, al tiempo que permite la interconexión de una gran cantidad de nodos.

## 4.7. Protocolos para el enrutamiento de una WSN

Los nodos no tienen un conocimiento de la topología de la red, deben descubrirla. La idea básica es que cuando un nuevo nodo, al aparecer en una red, anuncia su presencia y escucha los anuncios *broadcast* de sus vecinos. El nodo se informa acerca de los nuevos nodos a su alcance y de la manera de enrutarse a través de ellos, a su vez, puede anunciar al resto de nodos que pueden ser accedidos desde él. Transcurrido un tiempo, cada nodo sabrá que nodos tiene alrededor y qué forma tiene de alcanzarlos.

Los algoritmos de enrutamiento en redes de sensores inalámbricas tienen que cumplir las siguientes normas:

- Mantener una tabla de enrutamiento razonablemente pequeña.
- Elegir la mejor ruta para un destino dado (ya sea el más rápido, confiable, de mejor capacidad o la ruta de menos coste).
- Mantener la tabla regularmente para actualizar la caída de nodos, su cambio de posición o su aparición.
- Requerir una pequeña cantidad de mensajes y tiempo para converger.

### 4.7.1. Modelos de enrutamiento

#### 4.7.1.1 Modelo de un salto

Este es el modelo más simple y representa la comunicación directa. Todos los nodos en la red transmiten a la estación base. Es un modelo caro en términos de consumo energético, así como inviable porque los nodos tienen un rango de transmisión limitado. Sus transmisiones no pueden siempre alcanzar la estación base, tienen una distancia máxima de radio, por ello la comunicación directa no es una buena solución para las redes inalámbricas.

#### 4.7.1.2 Modelo multi-hop

En este modelo, un nodo transmite a la estación base reenviando sus datos a uno de sus vecinos, el cual está más próximo a la estación base, a la vez que este enviará a





otro nodo más próximo hasta que llegue a la mota base. Entonces la información viaja de la fuente al destino salto a salto desde un nodo a otro hasta que llega al destino. En vista de las limitaciones de los sensores, es una aproximación viable. Un gran número de protocolos utilizan este modelo.

#### 4.7.1.3 Modelo esquemático basado en clústeres

Algunos otros protocolos usan técnicas de optimización para mejorar la eficacia del modelo anterior. Una de ellas es la agregación de datos usada en todos los protocolos de enrutamiento basados en clústeres. Una aproximación esquemática rompe la red en capas de clústeres. Los nodos se agruparán en clústeres con una cabeza, la responsable de enrutar desde ese clúster a las cabezas de otros clústeres o la estación base. Los datos viajan desde un clúster de capa inferior a uno de capa superior. Aunque, salta de uno a otro, lo está haciendo de una capa a otra, por lo que cubre mayores distancias. Esto hace que, además, los datos se transfieran más rápido a la estación base. Teóricamente, la latencia en este modelo es mucho menor que en la de *MultiHop*. El crear clústeres provee una capacidad inherente de optimización en las cabezas de clúster. Por tanto, este modelo será mejor que los anteriores para redes con gran cantidad de nodos en un espacio amplio (del orden de miles de sensores y cientos de metros de distancia).



## 5. APLICACIONES EN EL SISTEMA DE ALUMBRADO. DISEÑO DEL SISTEMA

---

### 5.1. Introducción

Hasta el momento se han mostrado las tecnologías empleadas en el alumbrado público, desde los primeros sistemas de iluminación de arco eléctrico que requería una persona física para encender manualmente cada punto de luz. Lógicamente, los avances en ese campo llevaron a modelos muy implantados en la actualidad como son las lámparas de vapor de sodio de alta presión. Entre estos dos sistemas el cambio ha sido sustancial y muy aceptado tanto por los niveles de iluminación que ofrece esta tecnología como por su duración o nivel de vida. No obstante, se ha seguido invirtiendo grandes cantidades de dinero en conseguir una tecnología mejor y más eficiente para la iluminación, que en este caso se trata del LED, con todas las ventajas enumeradas anteriormente.

El encendido de estas luminarias se lleva normalmente a cabo desde un centro de control, el cual se encarga del encendido y apagado. Con el tiempo, se desarrollaron determinados dispositivos electrónicos que, instalados en el centro de mando que conecta con un determinado número de luminarias, permiten encender en una hora pre-establecida las luminarias y, también, su apagado. Se trata ya de sistemas electrónicos de control que permiten enviar información en tiempo real y optimizar el uso de las farolas.

Llegados a este punto donde se implantan sistemas de iluminación eficientes que reportan importantes ahorros en el consumo eléctrico, sistemas que optimizan la utilización de las farolas (como la programación por reloj astronómico o comunicación de todas las farolas al centro de mando mediante tecnología PLC, etc.) se pretende mejorar este sistema.

Por tanto, el objetivo que se persigue es el de integrar en una farola las tecnologías de las que se ha hablado: un sistema de iluminación eficiente con la posibilidad de crear su propia electricidad, y al mismo tiempo, implantar una red de sensores para ofrecer servicios de valor añadido. En el siguiente punto se describe cómo se integrarán estos componentes.

### 5.2. Descripción del sistema

El sistema que se pretende desarrollar es una farola con un sistema de iluminación eficiente, para el cual se empleará la tecnología LED y uno o varios módulos fotovoltaicos para la alimentar dicha fuente luminosa. Para mejorar el uso y eficiencia de la farola, la red sensorial que se incorporará monitorizará parámetros



ambientales como el nivel de iluminación para actuar sobre la farola y de esta manera encender y/o apagar la luminaria e incluso regular el nivel luminoso de la misma. Otra función que debe cumplir será la de gestionar el aparcamiento mediante el despliegue de los sensores oportunos.

El escenario que se considerará para estudiar esta idea puede ser en los alrededores de una gran superficie donde se puedan desplegar un número considerable de motas y se tenga una instalación de alumbrado exterior en la que se espera obtener un resultado favorable en cuanto a ahorro y eficiencia. Siguiendo estas ideas, se ha escogido el “Centro Comercial Parla Natura”, situado al noroeste de Parla (Madrid).

Sus coordenadas geográficas son:

Longitud: 40° 14' N

Latitud: 3° 46' O



Figura 37 – Situación del C.C. Parla Natura

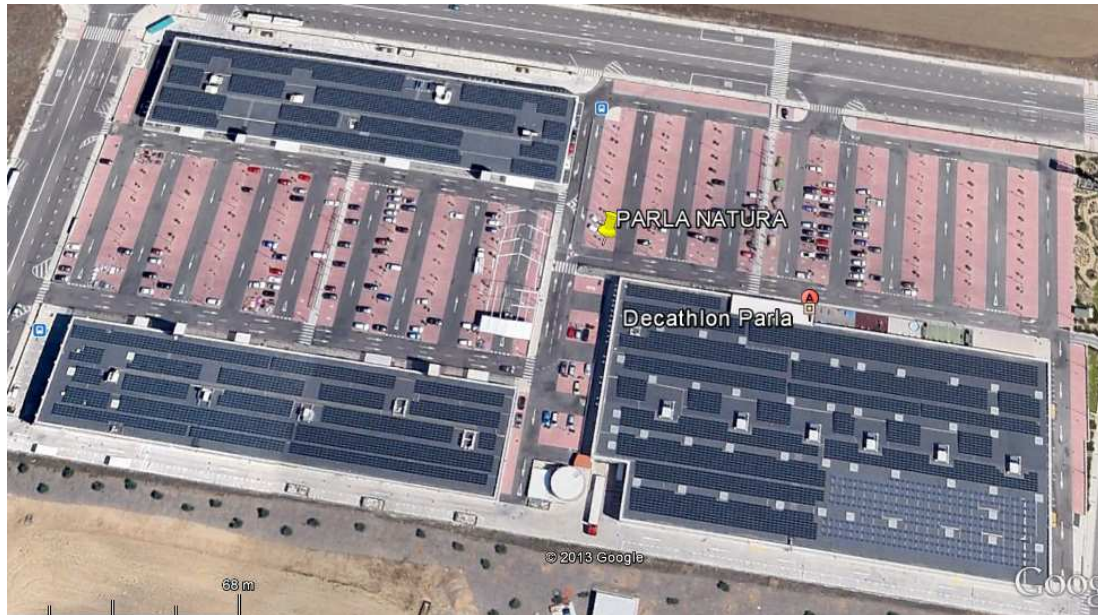


Figura 38 – C.C Parla Natura

Considerando este escenario, se tienen 1200 plazas de aparcamiento y diversos báculos con su correspondiente luminaria a una altura aproximada de 6 metros. Se considerarán los báculos que iluminan las zonas de aparcamiento, 120 unidades.

### 5.3. Solución propuesta

Antes de entrar en detalle en cada uno de los puntos que forman el sistema, se analizará la solución tecnológica más viable que se aplicará. Se divide en dos partes, la primera de ellas indica los conceptos sobre iluminación y energía solar; la segunda ahonda en la red de sensores:

- Los paneles fotovoltaicos reciben la energía solar y la transforman en energía eléctrica gracias al efecto fotovoltaico. Esta electricidad se encuentra en corriente continua y su aplicación directa será la de la alimentación de la luminaria que le permita el encendido. Pues bien, ya que a la salida del módulo fotovoltaico se tiene corriente continua, no se transformará a corriente alterna empleando una luminaria LED que funcione a la tensión que se obtiene del panel solar. Esto simplifica la instalación al tener el punto de consumo y de generación en la misma farola. No obstante, hay que tener en cuenta que dicho consumo y generación no coinciden en el tiempo, de forma que se recurre a los sistemas de acumulación, esto son las baterías. Asimismo, para gestionar la carga y descarga de la batería se empleará otro elemento adicional y obligatorio para esta modalidad de instalación, se trata de un regulador de carga, el cual adapta la tensión y la corriente a la salida del módulo

fotovoltaico para la entrada de la batería. De esta forma, ya se puede alimentar la carga.

- Para el caso de la red de sensores, a diferencia de instalaciones actuales por PLC u otra tecnología, se busca una red inalámbrica. Los principales requisitos que tiene que cumplir la instalación son:
  - Un sistema de bajo consumo energético.
  - Los datos a enviar no serán videos ni imágenes, por lo que no se requieren altas tasas de datos.
  - Que se facilite el despliegue de múltiples puntos o sensores.
  - Capacidad de ampliar la red con el tiempo son necesidad de modificar los nodos ya instalados. Un sistema fácilmente escalable.
  - La tecnología a emplear debe permitir una cobertura suficiente para el correcto funcionamiento en la transmisión de los datos.
  - Empleo de frecuencias libres y que facilite la implementación de los dispositivos.
  - El coste de los dispositivos no sean muy elevados para facilitar la implantación de este tipo de redes de sensores.

Para desarrollar este sistema se tiene claro que se empleará tecnología inalámbrica para formar una red de sensores para la aplicación mencionada. Dicha tecnología debe permitir la conexión de multitud de nodos sensores y/o actuadores (puede llegar a ser un número elevado) que formará la red incluso sin visión directa entre los nodos. De entre las distintas posibilidades mencionadas se optará por la tecnología Zigbee basada en el estándar IEEE 802.15.4, que regula el nivel físico y de control de acceso al medio.

El Zigbee es una red que se adapta perfectamente a los requisitos del sistema, ya que aprovecha la transmisión en frecuencias sin licencia pues opera en las frecuencias 868 MHz para Europa, 915 MHz en América y 2,4 GHz en el mundo. Mientras las dos primeras ofrecen un rango de transmisión de 20 y 40 Kbps con 11 posibles canales, la última de 250 Kbps con 16 canales. Para esta aplicación, se emplearán dispositivos que operan en la frecuencia de 2,4 GHz.

A diferencia de los entornos interiores donde las paredes de los edificios, los techos y otros obstáculos suponen una atenuación extra que reduce de forma considerable el radio de acción, esta tecnología permite radios de cobertura de centenas de metros en función del dispositivo empleado (módulo de comunicaciones), lo cual resulta suficiente ya que en el aparcamiento se encuentran relativamente cerca. Se instalará un nodo sensor por cada plaza de aparcamiento y otro nodo en cada farola, y





tendrán comunicación entre ellas formando la red. Este tipo de red permite un total de 65.536 nodos sensores por cada canal, con lo cual se puede implementar.

Finalmente y antes de profundizar más en la solución, el módulo de comunicación de referencia que se empleará será los de Xbee (Digi) y Arduino como los módulos de control.

### 5.3.1. Sistema de iluminación

El sistema de iluminación está formado por el báculo, la luminaria y el sistema de generación solar. Como se ha comentado, el objetivo de esta parte es la de conseguir alimentar la luminaria empleada con la mayor independencia posible de la red eléctrica.

Antes de analizar la potencia del panel o paneles solares a instalar se observará si realmente es posible en el entorno seleccionado, esto es, verificar las posibles sombras que afecten a la superficie de los paneles. Como se sabe, la orientación debe ser al sur puro para conseguir mayor captación, pues al ser la instalación en una farola esto no resulta ningún problema.



Figura 39 – Situación del C.C Parla Natura

Como se observa en la figura, no hay sombras sobre las farolas con lo cual sería viable su instalación a estos efectos. La inclinación de los paneles es otro de los conceptos de diseño a considerar y viene caracterizado, por un lado, por la latitud del emplazamiento y, por otro, por los requisitos de consumo vs producción. El consumo que se pretende satisfacer principalmente será el de la luminaria, aunque como se verá más adelante también para recargar la batería de los nodos situados sobre las farolas, pero no supone problema ninguno ya que es un parte mínima en relación a ella.

### 5.3.1.1 Luminaria

En este marco, para mejorar la utilización de la instalación se sustituirán las luminarias de VSAP de 171 W (150 W + balastro) por otras más eficientes de tecnología LED. Para este caso, la recomendación en los niveles de iluminación se encuentra entre 30-50 lx. Por tanto, a continuación se presenta un modelo de luminaria LED, de entre los diversos modelos presentes en el mercado, que se instala en forma de una placa con las fuentes luminosas adaptado a dicha luminaria.



#### Características Funcionales.

Parámetros	
Tipo de luminaria	Exterior
Altura	25 mm
Largo	205 mm
Ancho	190 mm
Material del Disipador	Aleación de Aluminio
Acabado del Disipador	Cubierta Acrílica
Control	Microcontrolador
Sistema de seguridad	Sensor de Temperatura
Tipo de alimentación	12 DC
Potencia máxima	106 Vatios
Vida operativa	> 50.000 horas (+90%)

#### Características Luminicas.

Parámetros	
Tipo de LED	Cree XLamp MX-6
VEEI *	1.62 W / m <sup>2</sup> / 100lx
Color	Bianco frío
Temperatura del color (CCT)	5000 – 8300 K
Nº de LEDs	96

Figura 40 – Datos de la luminaria

Este modelo, con un consumo total de 106 W, cumple con las características solicitadas situándose en valores altos de iluminancia media mantenida:

Nº	Emisores	Designación (Factor de corrección)	Em[lx]	P [W]
1	96	OD - V1 - 12DC - 96W	52	106.0
1	1	Philips STRADALUX 600 1ST600 1xHPL-N250W/542 CON R-P1 WKA (+18W balasto)	38	268.0
Parámetros		LED	VSAP	Vapor de Mercurio
Consumo		106 W	171 W (150W+balasto)	268 W (250W+balasto)
Ahorro LED		-	38%	60%

Figura 41 – Nivel de iluminación calculados a una altura de 5 metros



Como en esta instalación, la altura del foco luminoso se encuentra a 6 metros y el resultado obtenido por el fabricante se ha calculado a 5 metros, se aplicará la ley inversa de los cuadrados que relaciona la intensidad luminosa y la distancia a la fuente:

$$E = \frac{I}{r_1^2} \rightarrow I = E \times r_1^2 = 52 \text{ lx} \times 5^2 \text{ m} = 1300 \text{ cd}$$

$$E = \frac{I}{r_2^2} = \frac{1300 \text{ cd}}{6^2 \text{ m}} = 36 \text{ lx}$$

Puede observarse que con este modelo de luminaria LED se cumplen niveles de iluminación aceptables y permiten regular el brillo a través de un controlador, lo cual es importante para ahorrar energía en determinados momentos donde no se requiera la máxima potencia que puede suministrar. Simplemente mencionar que la placa radia hacia el pavimento con lo contribuye a no contaminar lumínicamente.

### 5.3.1.2 Requerimientos fotovoltaicos

Una vez definida la potencia de la luminaria a instalar se puede determinar el sistema fotovoltaico. La topología que se implementará es la de un sistema autosuficiente, aunque se aprovechará el hecho de que las farolas se encuentran conectadas a la red para casos en los que falla algún componente del sistema de alimentación. Como se ha comentado anteriormente, no se transformará la corriente continua a la salida del módulo en alterna ya que tanto la batería como la luminaria requieren de esta corriente continua:

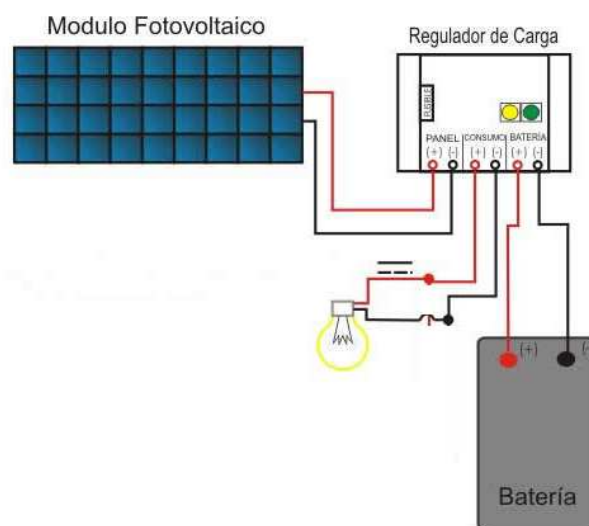


Figura 42 – Sistema solar fotovoltaico que se incorporará a la farola

Para un correcto dimensionamiento de la instalación se tienen que tener en cuenta a priori unos conceptos sobre la utilización de la misma:



- El perfil del consumo de energía: el gran consumo de energía se lleva a cabo por la luminaria LED. El horario de encendido de la misma varía un poco del invierno al verano debido al mayor número de horas de luz para el segundo. A efectos de simplificar los cálculos se considerará una situación intermedia a ambos. Asimismo, como la luminaria es regulable, hay horas en las que casi no hay tránsito de vehículos en el Centro Comercial, de forma que no lucen a máxima potencia durante todo el tiempo en que permanecen encendidas. Se puede fijar un horario para realizar los cálculos, si bien para que sea lo más real posible depende de las necesidades y requerimientos del propio Centro Comercial:
  - De 20:00 – 1:00 h lucen al 100 %.
  - De 1:00 – 4:00 h al 66 %.
  - De 4:00 – 6:00 h al 33%.
- Inclinación de los módulos: para calcular el ángulo de inclinación de los módulos se parte de la latitud del emplazamiento, en este caso 40°. Si se implementa para consumir la energía en verano se orienta más horizontalmente y, para el invierno, se instalaría más verticalmente. En este caso, considerando que el consumo energético se produce en igualdad de condiciones a lo largo de todo el año y, teniendo en cuenta que los módulos producen más energía en verano, se deben inclinar los módulos un poco más que la latitud (se tomará 45°).
- Como el horario de generación y el de consumo no coinciden se emplean baterías. Se considera que debe otorgar al sistema una autonomía de 3 días en las condiciones de utilización mencionadas.
- Como el consumo energético se produce a 12 V<sub>DC</sub>, todos los elementos operan entorno a esta tensión.

Con estas consideraciones de diseño para el Centro Comercial, se recurre a una base de datos para obtener los valores de irradiación en la zona (pvgis o nasa). En este punto, se empleará un software (*PVSYST*) donde, introduciendo todos estos parámetros, obtendremos los valores de la producción de los módulos fotovoltaicos. A continuación se muestran los resultados:



PVSYST V5.55		10/09/13	Página 1/4
<b>Sistema Aislado: Parámetros de la simulación</b>			
<b>Proyecto : PARLA NATURA</b>			
<b>Lugar geográfico</b>	<b>Madrid</b>	<b>País</b>	<b>España</b>
<b>Ubicación</b>	<b>Latitud</b> 40.5°N	<b>Longitud</b>	<b>3.5°W</b>
<b>Hora definido como</b>	<b>Hora Legal</b> Huso hor. UT+1	<b>Altitud</b>	<b>582 m</b>
<b>Datos climatológicos :</b>	<b>Madrid, Síntesis datos por hora</b>		
<b>Variante de simulación : Nueva variante de simulación</b>			
<b>Fecha de simulación</b> 10/09/13 22h26			
<b>Parámetros de la simulación</b>			
<b>Orientación Plano Receptor</b>	<b>Inclinación</b> 45°	<b>Acimut</b>	<b>0°</b>
<b>Características generador FV</b>			
<b>Módulo FV</b>	<b>Si-mono</b>	<b>Modelo</b> Suniap_SL5M_137	
	<b>Fabricante</b> Saint-Gobain	<b>En serie</b> 1 módulos	<b>En paralelo</b> 2 cadenas
<b>Número de módulos FV</b>	<b>N° módulos</b> 2	<b>Prom unitaria</b>	<b>137 Wp</b>
<b>N° total de módulos FV</b>	<b>Nominal (STC)</b> 274 Wp	<b>En cond. funciona.</b>	<b>237 Wp (50°C)</b>
<b>Potencia global generador</b>	<b>V mpp</b> 16 V	<b>I mpp</b> 15 A	
<b>Caract. funcionamiento del generador (50°C)</b>	<b>Superficie módulos</b> 2.2 m²	<b>Superficie célula</b> 1.8 m²	
<b>Factores de pérdida Generador FV</b>			
<b>Factor de pérdidas térmicas</b>	<b>Uc (const)</b> 20.0 W/m²K	<b>Uv (viento)</b> 0.0 W/m²K / m/s	
<b>-&gt; Temp. Opera. Nom. Cél. (G=800 W/m², Tamb=20° C, Viento=1m/s)</b>		<b>TONC</b>	<b>56 °C</b>
<b>Pérdida Óhmica en el Cableado</b>	<b>Res. global generador</b> 18 mOhm	<b>Fracción de Pérdidas</b>	<b>1.5 % en STC</b>
<b>Pérdidas por polvo y suciedad del generador</b>		<b>Fracción de Pérdidas</b>	<b>3.0 %</b>
<b>Pérdida Calidad Módulo</b>		<b>Fracción de Pérdidas</b>	<b>1.5 %</b>
<b>Pérdidas Mismatch Módulos</b>		<b>Fracción de Pérdidas</b>	<b>4.0 % (tensión fija)</b>
<b>Efecto de Incidencia, parametrización ASHRAE</b>	<b>IAM =</b> 1 - bo (1/cos I - 1)	<b>Parámetro bo</b>	<b>0.05</b>
<b>Parámetro del Sistema</b>	<b>Tipo de sistema</b>	<b>Sistema Aislado</b>	
<b>Batería</b>	<b>Modelo</b> S12-290 AGM		
	<b>Fabricante</b> Rollis		
<b>Características del banco de baterías</b>	<b>Tensión</b> 12 V	<b>Capacidad Nominal</b>	<b>234 Ah</b>
	<b>N° de unidades</b> 1		
	<b>Temperatura</b> Fijo (20°C)		
<b>Regulador</b>	<b>Modelo</b> General Purpose Default		
	<b>Tecnología</b> Undefined	<b>Coef. temp.</b>	<b>-5.0 mV/°C/elem.</b>
<b>Umbral de Regulación Baterías</b>	<b>Carga</b> 13.5/13.1 V	<b>Descarga</b>	<b>11.8/12.6 V</b>
	<b>Comando de Generador Auxiliar</b> 11.8/12.9 V		
<b>Necesidades de los usuarios :</b> Cons. domésticos diarios			
	<b>media</b>	<b>Constante durante el año</b>	
		<b>0.9 kWh/Día</b>	

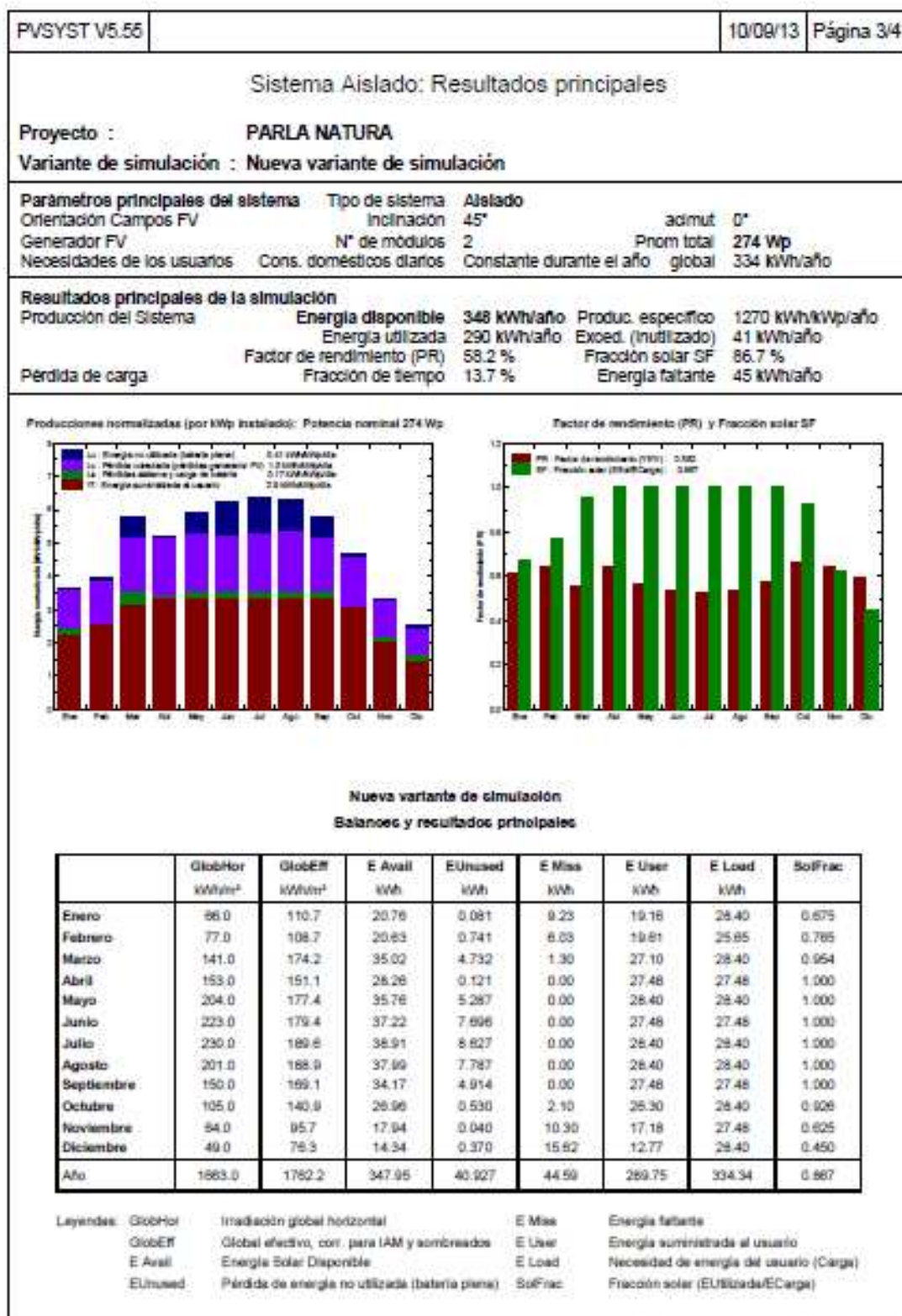
Traducción al español, todos los textos en inglés están garantizados.

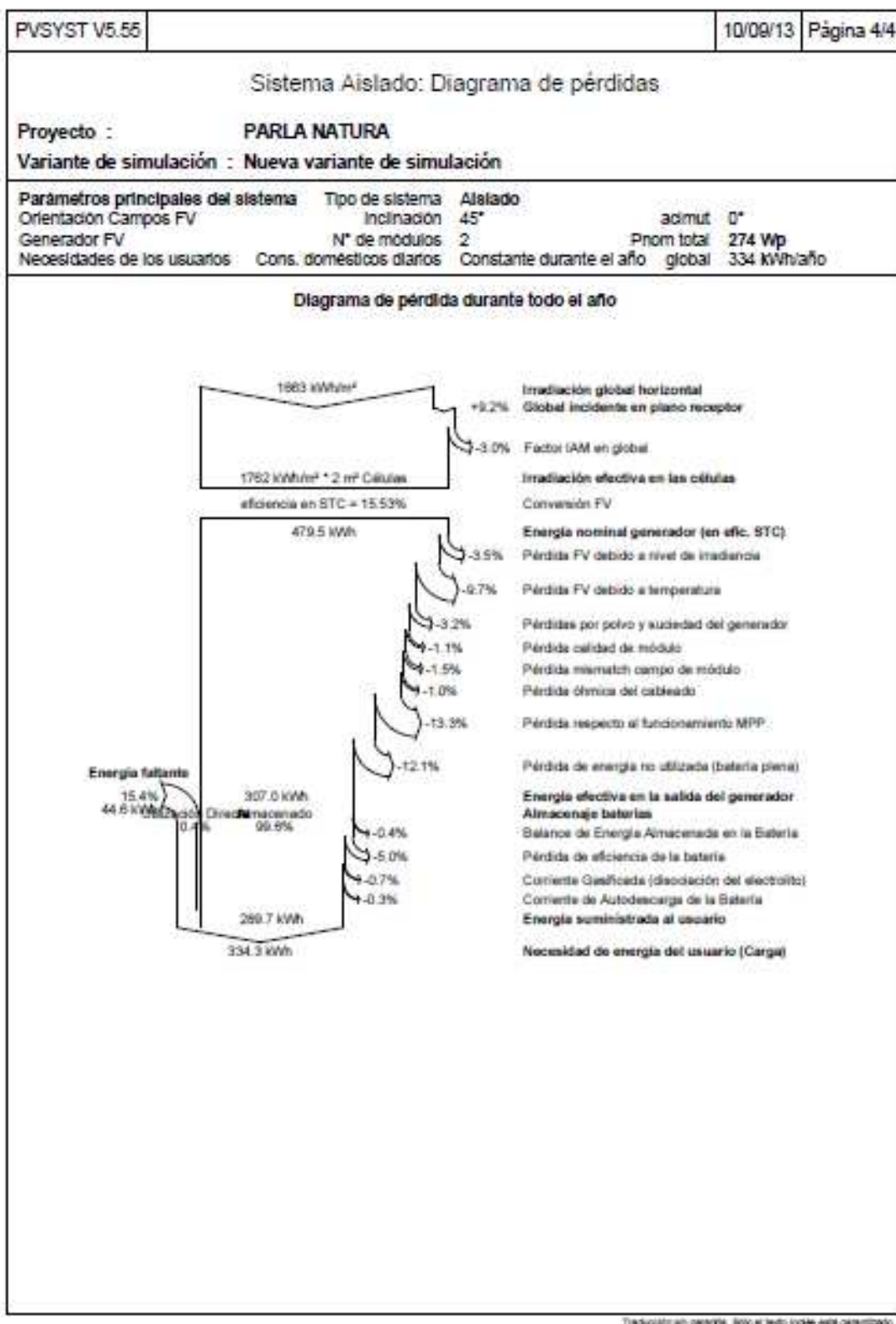


PVSYST V5.55		10/09/13	Página 2/4
Sistema Aislado: Necesidades detalladas del usuario			
Proyecto : <b>PARLA NATURA</b>			
Variante de simulación : Nueva variante de simulación			
Parámetros principales del sistema		Tipo de sistema Aislado	
Orientación Campos FV	Inclinación	45°	admut 0°
Generador FV	N° de módulos	2	Prom total 274 Wp
Necesidades de los usuarios	Cons. domésticos diarios	Constante durante el año	global 334 kWh/año
Cons. domésticos diarios, Constante durante el año, media = 0.9 kWh/día			
Valores anuales			
	Número	Potencia	Utilización
Lámparas fluorescentes	1	106 W/lámpara	6 h/día
TV/Magnetoscopio/PC	1	35 W/art.	2 h/día
Electrodomésticos	1	70 W/art.	3 h/día
Energía total diaria			916 Wh/día
Perfil por hora			

Traducción sin garantía, sólo el texto inglés está garantizado.









Como resumen de la solución para el abastecimiento energético de la luminaria LED con potencia de consumo de 106 W el entorno de simulación requiere un campo solar fotovoltaico aproximadamente de 250 W. Se puede implementar con un único módulo, pero presenta dos inconvenientes: la tensión de trabajo es más elevada y su mayor tamaño, lo cual puede ser desventajoso porque supone una carga adicional por el viento para la estructura que lo sostiene. Por ello, hay mayor variedad de módulos fotovoltaicos de potencia de 125 W o similar que trabajan a tensiones más próximas a la del sistema (12 V) y se tendrían que conectar en paralelo.

En cuanto al almacenamiento de energía en la batería se opta por un acumulador de GEL con tensión de 12 V. Para otorgar al sistema de una autonomía de 3 días tiene que tener una capacidad aproximada de 250 Ah.

Y para el regulador de carga, se emplea cualquier modelo que trabaje a la tensión del sistema y pueda alimentar las cargas.

La situación de la batería en la farola puede ser en una arqueta con las conexiones de la red. El regulador puede hallarse tras uno de los módulos sujeto a la estructura gracias a su pequeño tamaño.



**Figura 43 – Farola fotovoltaica con dos módulos**

Para concluir este apartado, la energía eléctrica que se puede demandar de la red para alimentar una farola es de 44,50 KWh/año (puede ser debido a condiciones climáticas adversas). Sin embargo, en la situación actual con luminarias de VSAP de 171 W y sin dispositivos ahorradores se requiere de la red, suponiendo las mismas horas de encendido que para el estudiado, 686,56 KWh/año. El consumo energético con el modelo propuesto oscila entre el 6 y el 7 % respecto de la situación actual.

### 5.3.2. Sistema de red sensorial

La red sensorial con tecnología Zigbee tiene varias aplicaciones y varios tipos de nodos.

Se distinguirán las características de cada una de ellas en función de su aplicación:

#### 5.3.2.1 Nodos encaminados a la gestión del aparcamiento

Los nodos encaminados a la gestión del aparcamiento. Su finalidad es ofrecer a los vehículos una rápida localización de las plazas libres lo que reduce los tiempos de búsqueda y optimiza el espacio disponible. Esto es posible a través de unos sensores encaminados a detectar si hay un vehículo en una plaza o no. La solución que se propone para conseguir esto es mediante un sensor magnético, con lo que no es necesario instalar en el vehículo ningún dispositivo adicional. Esto es una ventaja, ya que podría resultar inviable la opción de instalar algún dispositivo.



Figura 44 – Farola fotovoltaica con dos módulos

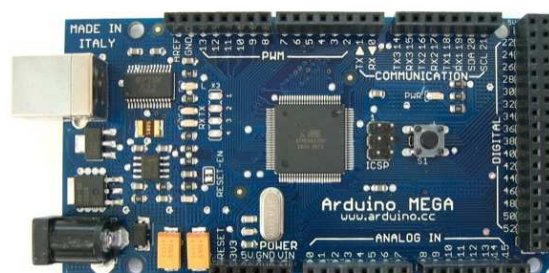
En la figura anterior se muestra el escenario donde se pretende instalar cada uno de estos sensores y se han dibujado a modo de referencia con un círculo azul, por lo tanto hay tanto sensores como plazas de aparcamiento (1200). Como se decía se tratan de sensores magnéticos, los cuales detectan el campo magnético o las corrientes eléctricas. Un ejemplo es el que se basa en un interruptor de Reed, se trata de un par de láminas metálicas de materiales ferromagnéticos halladas en el interior de una cápsula que, al detectar el campo magnético, se cierra el circuito y, en definitiva, se produce una variación de la resistencia eléctrica en el circuito. Por tanto este sensor puede detectar la presencia de un elemento móvil, el vehículo, con la ventaja de que no necesita ser empujado físicamente.

Este sensor se presenta en el mercado en forma de sonda o como una placa (se prefiere ya que se puede calibrar como el modelo del desarrollador de hardware Libelium):



Figura 45 – Tipos de sensores magnéticos

En ambos casos se tratan de sensores, el primero por conmutación y el segundo mide el campo magnético en los 3 ejes (la variación del campo magnético lo provoca el chasis del coche). Sea el modelo que se quiera emplear, los sensores deben ir acoplados a la placa de microcontrolador (por ejemplo Arduino Mega). De esta forma, cada sensor magnético constituirá un nodo sensor o un nodo esclavo que detecta si la plaza está ocupada o no. Esta información pasa a través de un conversor analógico digital que se conecta en una de las entradas digitales de la placa Arduino, el cual está asociado a un módulo de comunicaciones para transmitir dicha información.

**General data:**

Microcontroller:	ATmega1281
Frequency:	14.7456 MHz
SRAM:	8KB
EEPROM:	4KB
FLASH:	128KB
SD Card:	2GB
Weight:	20gr
Dimensions:	73.5 x 51 x 13 mm
Temperature Range:	[-10°C, +65°C]
Clock:	RTC (32KHz)

**Consumption:**

ON:	15mA
Sleep:	55µA
Deep Sleep:	55µA
Hibernate:	0.07µA

Operation without recharging: 1 year \*

\* Time obtained using the Hibernate mode as the energy saving mode

**Built-in sensors on the board:**

Temperature (+/-): -40°C, +85°C. Accuracy: 0.25°C  
 Accelerometer: ±2g (1024 Lsb/g) / ±6g (340Lsb/g)  
 40Hz/160Hz/640Hz/2560Hz

**Inputs/Outputs:**

7 Analog (I), 8 Digital (I/O), 1 PWM,  
 2 UART, 1 I2C, 1 USB, 1 SPI

**Electrical data:**

Battery voltage:	3.3 V - 4.2V
USB charging:	5 V - 100mA
Solar panel charging:	6 - 12 V - 280mA

Figura 46 – Placa Arduino empleado por muchas plataformas de desarrollo de sensores y dispositivos *wireless* y sus características

Se pretendía ubicar estos sensores junto al bordillo, pero para su correcto funcionamiento tiene que encontrarse por debajo del vehículo una vez estacionado:





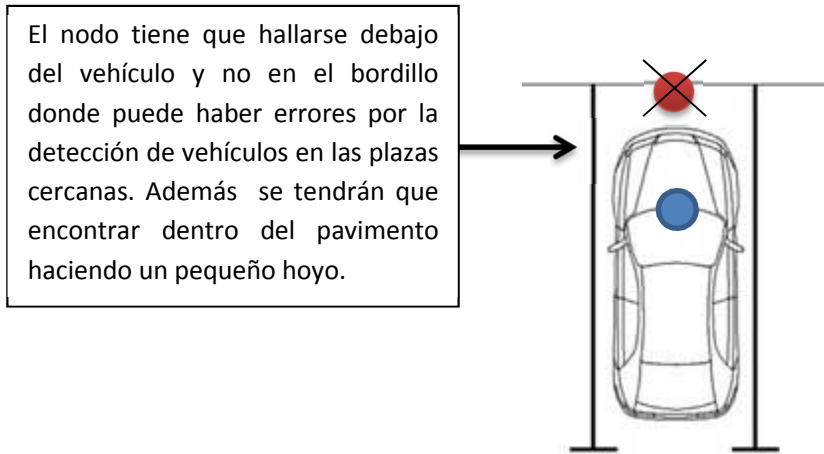


Figura 47 – Ubicación de cada nodo sensor

Debido a su ubicación en el pavimento y, a efectos de reducir las tareas de operación y mantenimiento, tienen que ser autónomas. Se tiene la ventaja de que es un nodo RFD (*Reduced Function Device*), es decir, dispositivos con funcionalidad reducida. Solamente puede recibir órdenes e informar al coordinador de red más cercano. Son los dispositivos finales, y se programan cada cuánto tiempo toman los datos del medio, de forma que la mayor parte del tiempo lo pasan “dormidos”.

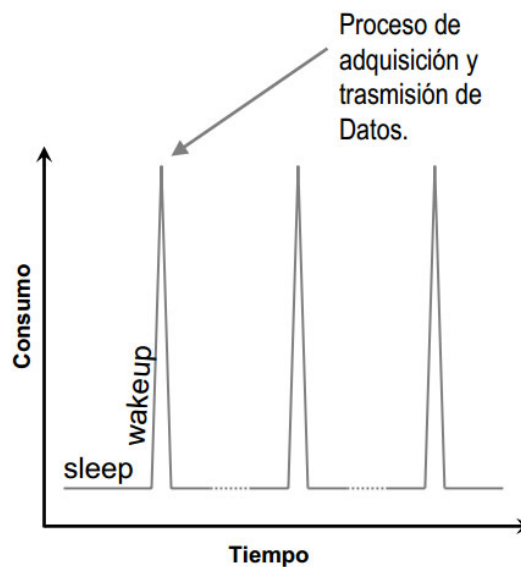


Figura 48 – Estados del nodo sensor

Para este caso donde no se dispone de sistema de alimentación, el nodo tiene que incluir una batería que le asegure una larga duración de forma no recargable. Esto es posible gracias al bajo consumo de la mota. Así, el consumo se produce cuando se detecta actividad en el nodo, con lo que se puede ver la duración de la batería en función del módulo de comunicaciones empleado y configurando el sensor para que el intervalo de la toma de muestras se de 5 minutos:

	Xbee a 2,4 GHz	Xbee a 868 MHz
<b>Tiempo “dormido” y consumo</b>	298,1 s // 64 $\mu$ A	297,3 s // 64 $\mu$ A
<b>Tiempo de medida y consumo</b>	380 ms // 33 mA	380 ms // 33 mA
<b>Tiempo de transmisión y consumo</b>	1,52 s // 72 mA	2,32 s // 90,5 mA
<b>Consumo medio de un ciclo completo</b>	0,470 mA	0,805 mA

Tabla 4 – Consumo por actividad del nodo

Con esta relación de los consumos en la actividad del nodo sensor, se puede obtener la duración de las baterías, las cuales se pueden encontrar en cualquier tienda de electrónica:

	Xbee a 2,4 GHz	Xbee a 868 MHz
<b>Corriente de autodescarga para batería de 26 Ah</b>	88 $\mu$ A	88 $\mu$ A
<b>Corriente de autodescarga para batería de 52 Ah</b>	176 $\mu$ A	176 $\mu$ A
<b>Duración estimada para batería de 26 Ah</b>	5,3 años	3,3 años
<b>Duración estimada para batería de 52 Ah</b>	9,1 años	6 años

Tabla 5 – Nivel de vida de la batería



Figura 49 – Batería de litio de 26Ah. El modelo que se propone asocia dos de estas baterías para aumentar su capacidad al doble

También es importante mencionar las características del módulo de comunicaciones que se emplea y que gracias a este se puede llevar la información de un nodo a otro:

Typical (indoor/urban) range	40 meters
Best (line of sight) range	120 meters
Transmit/Receive current	40/40 mA
Firmware (typical)	ZB ZigBee mesh
Digital input/output pins	11
Analog input pins	4
Analog (PWM) output pins	None
Low power, low bandwidth, low cost, addressable, standardized, small, popular	Yes
Interoperable mesh routing, ad hoc network creation, self-healing networks	Yes
Point-to-point, star topologies	Yes
Mesh, cluster tree topologies	Yes
Single firmware for all modes	No
Requires coordinator node	Yes
Point-to-point configuration	More involved
Standards-based networking	Yes
Standards-based applications	Yes
Underlying chipset	Ember
Firmware available	ZB(ZigBee 2007), ZNet 2.5 (obsolete)
Up-to-date and actively supported	Yes

**Figura 50 – Características del módulo Xbee para la comunicación radio con alcances exteriores superiores a 120 metros**

Una vez que se tienen definidos todos los componentes que forman el nodo sensor se procede a su instalación. Para ello, una vez disponible el hueco se introduce la mota en el interior de una carcasa que no sea metálica (ej.: PVC) y luego se procede a cubrirlo con alguna silicona o resina tipo epoxi o similar para aislarlo de las condiciones atmosféricas. Finalmente, se cubre para que el asfalto que lo más regular posible.

Realizando esta tarea para cada una de las plazas del aparcamiento se habrían instalado 1200 unidades. Se tiene de esta forma un parte importante de la red de sensores.

La topología de la red que permite emplear esta tecnología inalámbrica para las comunicaciones entre dispositivos son diversas. Se optará por una topología en malla o *mesh*, de forma que la red permite cubrir toda la cobertura del aparcamiento. Esto es posible gracias a que cada nodo se puede comunicar con el nodo vecino más próximo (en este caso el nodo le manda una confirmación de recepción de los paquetes enviados) hasta llegar al nodo coordinador. Si hay un nodo que se ha caído, se busca un camino de forma automática para que los paquetes lleguen al destino. Por tanto, además de cubrir

la superficie necesaria con el número máximo de nodos que permite la tecnología se dispone de varios caminos para el envío de los paquetes reduciendo el tráfico y los nodos no tendrán que retransmitir el mensaje, con lo cual pueden volver al estado “dormido” y así no consumir los recursos energéticos.

Estos dispositivos, con el módulo de comunicaciones Xbee ZB serie 2, transmiten la señal con una potencia de 2 mW que, en entornos urbanos alcanzan los 40 metros de cobertura y en la línea de visión directa superior a 120 metros. La siguiente etapa de nodos irá instalados en la propia farola, de forma que hay que asegurarse que la señal de los nodos anteriores les llega. Se anticipa que para los nodos de las farolas se empleará el mismo interfaz radio.

$$A_{el} (dB) = 32,45 + 20 \log d (Km) + 20 \log F (MHz)$$

$$F = 2400 \text{ MHz}$$

$$d = 7 \text{ m} = 0,007 \text{ Km}$$

$$A_{el} (dB) = 56,95 \text{ dB}$$

$$Pr = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - A_{el} - A_{capa \text{ asfalto}} = 3 \text{ dBm} + 2 \text{ dB} + 2 \text{ dB} - 56,95 \text{ dB} - 5 \text{ dB} = -54,95 \text{ dBm} \approx -55 \text{ dBm}$$

Según las especificaciones de esta antena la potencia recibida se encuentra por encima de la sensibilidad mínima del nodo receptor, por tanto en la transmisión del nodo cercano a la farola no hay problema en la cobertura de la señal:

$$-96 \text{ dBm} \leq -55 \text{ dBm}$$

### 5.3.2.2 Nodos situados en el báculo

Hasta el momento se tendrían desplegados 1200 dispositivos finales, los cuales crean una red de comunicación hasta llegar a los nodos siguientes que se encuentran situados en el báculo de la farola. En la siguiente figura se muestra esta situación:



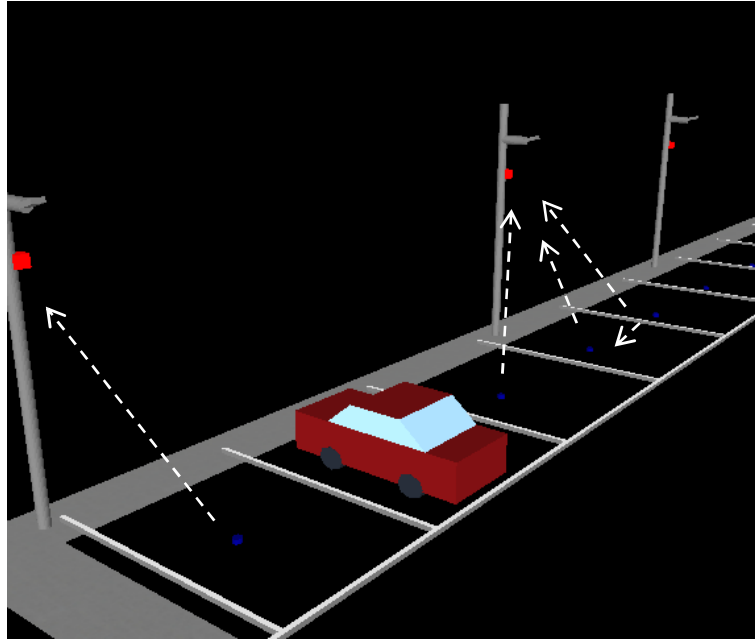


Figura 51 – Características del módulo Xbee ZB para la comunicación radio

Como se ve cada nodo se puede comunicar directamente con el nodo superior o bien a través del nodo vecino estableciendo una topología de malla. De la misma forma, si un nodo no se encuentra operativo busca otro camino para llegar a él así como favorece que no haya tráfico en el envío de los paquetes de datos y, por lo tanto, se reduce la probabilidad de pérdida de datos. Es conveniente destacar que este nodo es un dispositivo FFD (*Full Function Device*), es decir, que puede actuar como un nodo coordinador o como un nodo sensor. Con la topología mencionada, los primeros nodos sensores envían la información a los nodos de los báculos (nodos centrales), que se encuentran en la topología en un nivel superior ya que tienen la posibilidad de enrutar los paquetes hacia el nodo coordinador:

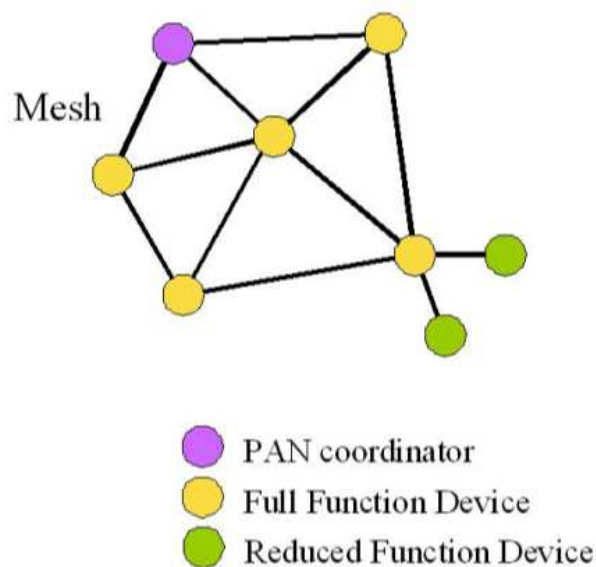
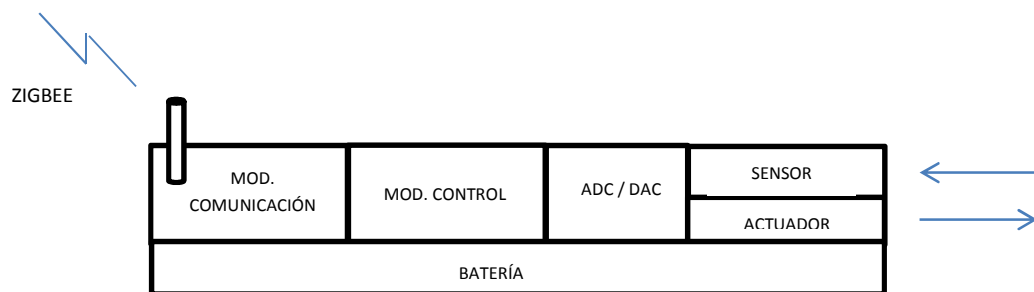


Figura 52 – Distinción de los componentes en la red

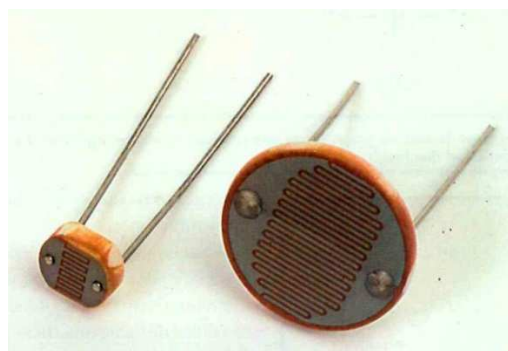
La tecnología que se propone para estos nodos centrales se basan en los anteriores, esto es, la placa de control de Arduino, el módulo de comunicaciones Xbee que transmite a la frecuencia de 2,4 GHz con el protocolo de comunicaciones Zigbee y con potencia transmitida de 2 mW. Los datos que llegan a este nodo indicando las plazas libres u ocupadas se indicarán a través de displays configurado en uno de los pines de salida de placa como periférico. Así el usuario tiene la información captada y procesada por esta parte de la red, para lo que hay que programar el microcontrolador para realizar la función de sumar o restar las plazas libres.

En adición, en estos nodos se implementarán la función de gestión del alumbrado, esto es, la posibilidad de encender y/o apagar la luminaria que controla. El número de nodos centrales son tantos como báculos con luminarias se quiera controlar, en este caso serán todas las que se encuentran en la zona de aparcamiento. El esquema constructivo de este nodo es el como el que se muestra en la figura siguiente:



**Figura 53 – Esquema de nodos centrales**

Para tener caracterizado todos los componentes de este nodo queda por definir el sensor y el actuador. Para el primer caso, se propone un sensor luminoso LDR como el que se muestra en la figura:



**Figura 54 – Sensor de luminosidad LDR**

La LDR se trata de un sensor capaz de detectar el grado de luminosidad que incide sobre una superficie. El comportamiento es como el de una resistencia que varía su valor inversamente proporcional a la cantidad de luz que incide sobre su superficie sensible, es decir, con la máxima luminosidad apenas hay resistencia eléctrica entre sus dos terminales, elevándose a millones de ohmios en la oscuridad. Para adaptar este sensor a la placa del controlador se conecta en serie a una resistencia obteniendo una

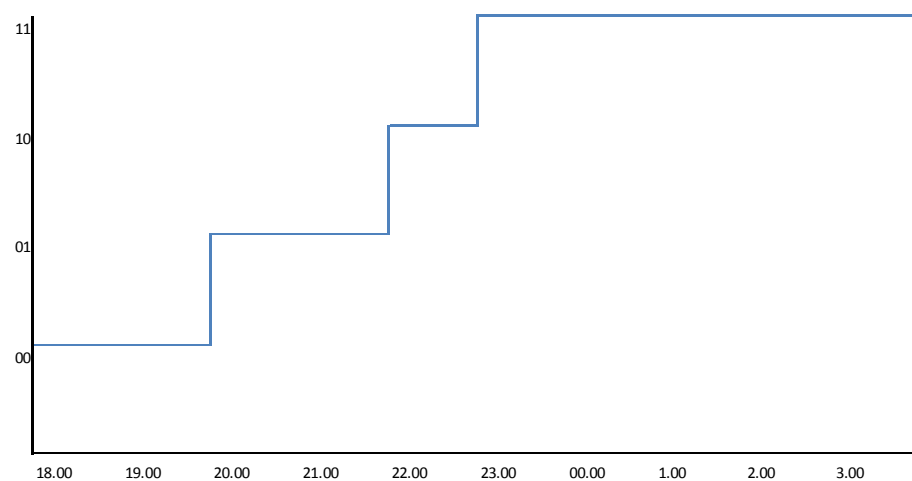
tensión de salida analógica proporcional a la luminosidad que incide sobre ella. Finalmente la conexión al microcontrolador se realiza a través de un conversor A/D, y éste va a una de las entradas digitales de la placa de control. Se va a emplear para regular el encendido de las bombillas de la farola, pues el valor de la resistencia equivalente de la LDR es función de la luminosidad captada. A partir de aquí, se programa el microcontrolador. A fin de aumentar la eficiencia energética de la instalación se programará para encender la luminaria cuando el valor de luminosidad detectado se encuentra por debajo de un umbral mínimo pre-definido, y se apague cuando el valor detectado esté por encima de otro valor umbral máximo igualmente pre-definido. Así mismo, entre ambos umbrales se proponen otros dos valores para regular la potencia aplicada al sistema de encendido. En niveles digitales a la entrada del microcontrolador se podría tener:

00 → nivel de iluminación razonable. Se mantiene apagada la luminaria.

01 → nivel de iluminación medio. Se enciende la luminaria con la potencia regulada al 33 %.

10 → nivel de iluminación bajo. Se incrementa la potencia para el encendido al 66 %.

11 → nivel de iluminación muy bajo. Encendido de la luminaria al 100 % de la potencia.



**Figura 55 – Modo de actuación de la luminaria en función de la programación especificada**

Para que este proceso se desarrolle con éxito el microcontrolador envía la información a un actuador. Este actuador se trata de un relé que, controlado por el circuito eléctrico, permite abrir o cerrar el circuito de salida conectando de esta forma las cargas.



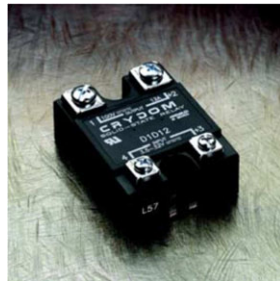


Figura 56 – Relé de estado sólido para el encendido y apagado de bombillas

El relé elegido es de estado sólido, tiene las mismas funciones que uno tradicional electromecánico pero sin las partes móviles y es fácilmente integrable. Las características de este relé son las que le permiten operar a la tensión de entrada y suministrar a la salida una tensión a 12 V<sub>DC</sub>, ya que ésta será la tensión a la que trabajan las luminarias, y de igual forma sucede con la corriente que puede llegar a suministrar (12 A). En la siguiente figura se puede observar sus características:

#### PRODUCT SELECTION

Load Voltage	7A	10A	12A	20A	40A
100 VDC	D1D07		D1D12	D1D20	D1D40
200 VDC	D2D07		D2D12		D2D40
400 VDC	D4D07		D4D12		
500 VDC	D5D07	D5D10			

#### OUTPUT SPECIFICATIONS (1)

Description	7A	12A	20A	40A	7A	12A	40A	7A	12A	7A	10A
Operating Voltage Range	0-100	0-100	0-100	0-100	0-200	0-200	0-200	0-400	0-400	0-500	0-500
Maximum Off-State Leakage Current @ Rated Voltage [mA]	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3
Maximum Load Current (3) [Adc]	7	12	20	40	7	12	40	7	12	7	10
Minimum Load Current [mA]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Maximum Surge Current [Adc] (10ms)	15	28	42	106	22	27	106	17	36	19	29
Maximum On-State Voltage Drop @ Rated Current [Vdc]	2.0	1.6	2.1	2.1	2.0	2.8	2.1	4.2	4.2	5.7	5.5
Thermal Resistance Junction to Case [Rjc] [°C/W]	2.2	1.34	1.06	0.83	1.5	1.06	0.83	1.06	0.8	1.0	0.8
Maximum On-State Resistance [RDS-ON][Ohms]	0.29	0.13	0.10	0.05	0.29	0.23	0.05	0.6	0.35	0.8	0.55

#### INPUT SPECIFICATIONS (1)

Description	DC Control
Control Voltage Range	3.5-32 VDC
Minimum Turn-On Voltage	3.5 VDC
Minimum Turn-Off Voltage	1.0 VDC
Maximum Input Current (1-DC only)	1.6 mA (5 VDC), 28 mA (32 VDC)
Nominal Input Impedance	See Note 4
Maximum Turn-On Time [μsec]	100
Maximum Turn-Off Time [msec]	1.0

#### GENERAL SPECIFICATIONS

Description	Parameters
Dielectric Strength, Input/Output/Base (50/60Hz)	2500 VRMS
Minimum Insulation Resistance (@ 500 V DC)	10 <sup>9</sup> Ohm
Maximum Capacitance, Input/Output	50 pF
Ambient Operating Temperature Range	-20 to 80°C
Ambient Storage Temperature Range	-20 to 125 °C
Weight (typical)	3.0 oz (86.5g)
Encapsulation	Thermally conductive Epoxy
Terminals	Screws and Saddle Clamps Furnished, Unmounted
Recommended Terminal Screw Torque Range:	6-32 Screws - 10 in lbs. 8-32 and 10-32 Screws -20 in. lbs. (Screws dry without grease)

Figura 57 – Características del relé (12 A)

Como nota adicional, para este tipo de nodo se propone una batería de litio pero que se pueda recargar con la instalación solar. Es un nodo con función de encaminamiento de los paquetes hacia el nodo coordinador y con la capacidad de controlar la luminaria, por tanto se prevé que tendrá más actividad que el nodo que detecta la plaza de aparcamiento. La recarga de la batería se realiza gracias a la





instalación fotovoltaica en el báculo de la farola que se conecta con la placa del microcontrolador, pues éste tiene una entrada para energía solar u otra alternativa ( $12V_{DC}$ ). Con este sistema se asegura el correcto funcionamiento y autonomía del nodo.

Los nodos centrales crean una red entre ellos para establecer un camino de comunicación con el nodo coordinador o *Gateway*. Para que esto se produzca sin problemas, hay que asegurarse que hay una buena correspondencia entre los nodos:

$$Pr = Ptx + Gtx + Grx - Ael = -96 \text{ dBm}$$

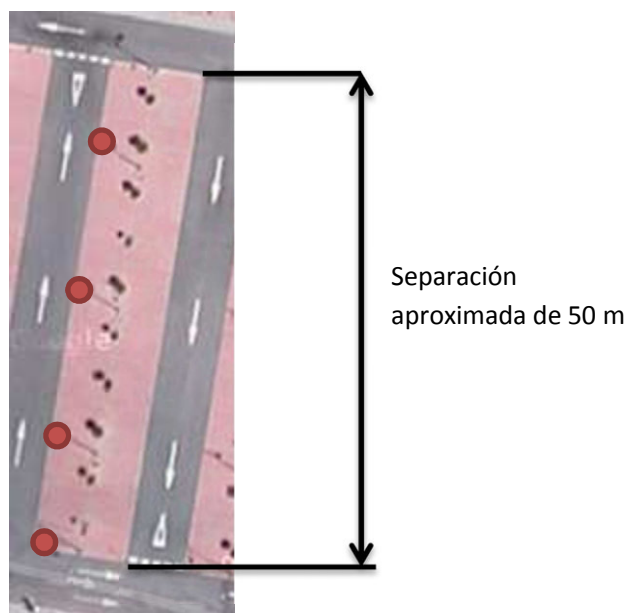
$$Ael \text{ (dB)} = 96 \text{ dBm} + 7 \text{ dB} = 103 \text{ dB}$$

$$F = 2400 \text{ MHz}$$

$$Ael \text{ (dB)} = 32,45 + 20 \log d \text{ (Km)} + 20 \log F \text{ (MHz)}$$

$$d \text{ (Km)} = 1,4 \text{ Km} = 1.400 \text{ m}$$

Como se observa en las expresiones anteriores, los nodos que se encuentran en la farola se encuentran en entorno exterior, la mayoría con visión directa entre ellas. En este caso, no hay más obstáculo para las ondas electromagnéticas que el propio medio, de forma que se alcanzan coberturas grandes para este tipo de redes. En el aparcamiento del centro comercial hay instaladas entre 4 y 5 farolas por cada línea de aparcamiento:



**Figura 58 – Línea de aparcamiento con 4 nodos por cada sección**

Finalmente, como no hay problemas en la comunicación entre los nodos de este nivel, se tendrían que instalar 120 unidades.

### 5.3.2.3 Nodo coordinador o Gateway

La red que se ha desarrollado está encaminada a enviar los datos del medio al nodo coordinador. El nodo coordinador es el encargado de generar la red y del control del acceso al medio de cada uno de los dispositivos conectados a él. La aplicación del dispositivo comienza con una petición en la lista de canales para realizar una búsqueda de los canales indicados. Se compara la lista de canales con la lista de red, entonces se selecciona uno de los canales que se encuentre libre. Una vez se identifica el canal, la aplicación del dispositivo selecciona los atributos de seguridad de la capa y trama correspondientes a los parámetros de configuración. Después la aplicación chequea si se ha podido establecer el PAN en el canal.

El coordinador ZigBee debe permitir que otros dispositivos se unan a la red basándose en sus parámetros de configuración; como pudieran ser la duración de la incorporación del dispositivo a la red o el número máximo de elementos que se pueden unir.

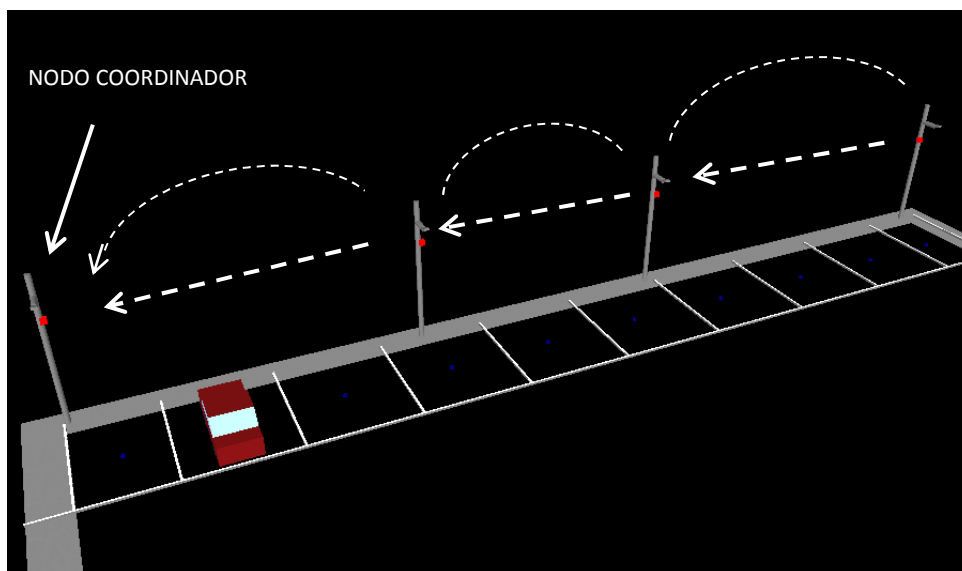
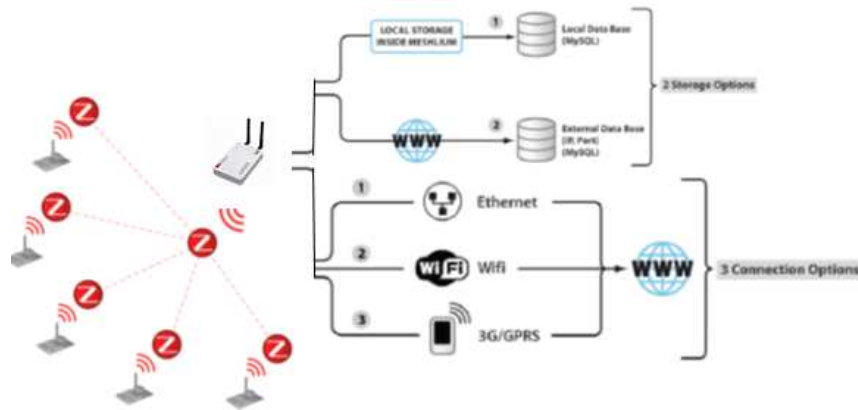


Figura 59 – Comunicación de nodos FFD a nodo coordinador

La comunicación entre los nodos encaminadores hasta llegar al nodo coordinador se basa en la técnica *Multi-hop* (capacidad de enviar mensajes de igual a igual hacia una estación base permitiendo que el sistema sea escalable). Se trata de una red donde la transmisión de los datos se produce de forma fiable, los paquetes de datos van saltando de un nodo a otro, pues al ser una red grande puede haber un nodo caído por cualquier circunstancia de forma que se escoge de forma autónoma otra ruta para seguir con la comunicación y de esta manera la red sigue enviando datos de forma fiable. Sin esta topología, si un nodo cae, la comunicación se ve afectada. Suman la ventaja de aumentar el tiempo de vida de las baterías.

Ante la importancia del nodo coordinador se recomienda que se encuentre conectado a la red eléctrica. Se puede instalar en un poste o junto a la fachada del edificio del centro comercial por la facilidad de conexión eléctrica.

Para concluir este proceso, los datos recogidos por la red de sensores serán enviados a la “nube” a través de la pasarela (*Gateway*). Al recibir los datos el *Gateway* los analiza y puede presentar la opción de almacenarlo en la base de datos local o remota.



**Figura 60 – Opciones de almacenamiento y conexión a internet**

El objetivo final es la de comunicarse remotamente a esta red gracias al desarrollo de la aplicación oportuna en un entorno web accesible a través de GPRS, WIFI y Ethernet. Por tanto, esta aplicación recibiría toda la información de la red permitiendo crear alertas, programaciones para las luminarias, conocer en tiempo real el estado del aparcamiento, conocer el consumo de las luminarias y actuar sobre ellas. Como mejora a este sistema se pueden incluir sensores ambientales como de temperatura o humedad que amplíen la información en el entorno web.

### 5.3.3. Modelo esquemático del sistema

En este punto se mostrará un esquema-resumen de la solución adoptada resultado de la convergencia del modelo de farola eficiente con la implementación de la red de sensores inalámbrica que emplea el protocolo Zigbee:

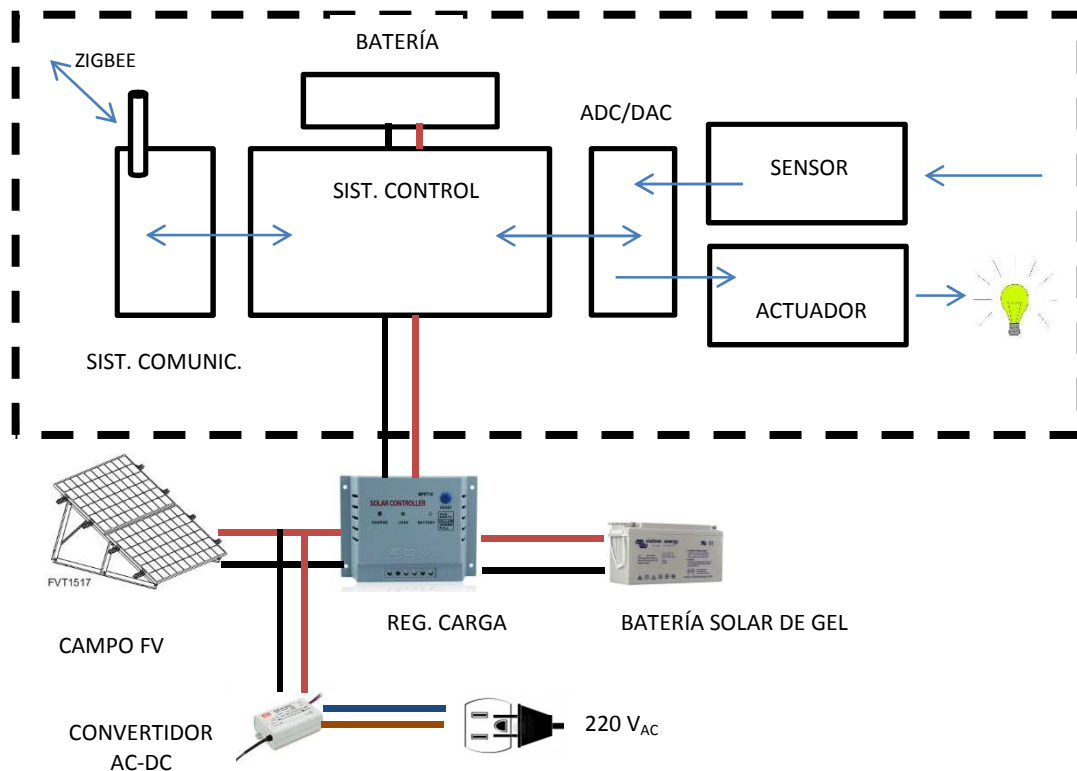


Figura 61 – Esquema ilustrativo de los componentes en una farola

Para que el sistema desarrolle su actividad de forma exitosa es importante destacar una buena programación del microcontrolador. Esta programación se realiza en el lenguaje diseñado por la propietaria de la placa de control.

## 5.4. Estado del mercado

El diseño que se ha mostrado está formado básicamente por dispositivos o componentes electrónicos, los cuales tecnológicamente se encuentran en la lucha de lograr un *hardware* cada vez más pequeño de tamaño y más versátiles. Un ejemplo de estos son los teléfonos móviles que cada vez incluyen mayor número de funcionalidades, con capacidad de conectarse a distintas redes y en armonía de reducir su tamaño. Esta tendencia se puede aplicar tanto a los módulos solares, que a medida que pasa el tiempo se consiguen células más eficientes, como a los demás componentes de la instalación solar, así como a las luminarias LED.

Se hará un repaso a cada uno de estos mercados mencionando los aspectos más destacables:

#### 5.4.1. Sistema fotovoltaico solar

El campo de la energía solar fotovoltaica está tan avanzado y se desarrollado que existe una enorme variedad de fabricantes de cada tipo de material. En España existen muchos megavatios de energía solar que emplean el material de las compañías que se mencionan en cada apartado.

- Módulo solar: Se comercializan módulos monocristalinos, policristalinos y módulos *thin film*. Los primeros son de mayor eficiencia gracias a la calidad del silicio, sin embargo los módulos policristalinos son los más comercializados por la relación calidad-precio. Los de *thin film* son módulos que integran en la propia placa un 30 % menos de potencia con lo que incrementa el coste de una instalación aunque tiene la ventaja de producir energía eléctrica por radiación difusa.

En cuanto a los más comercializados, los de policristalino, alcanzan potencias de 300 W por panel.

Debido a los costes de producción, el 80-90 % de los módulos se fabrican en China. Como fabricantes de referencia destacan: First Solar, Sharp, Suntech, Yingly Green Energy, Sun Power, Sanyo/Panasonic, entre otros.

- Regulador de carga: los dispositivos más consolidados en el mercado tanto de reguladores como de inversores (aunque no se requieren en esta aplicación) se encuentran en Alemania. Son dispositivos que se emplean en las instalaciones aisladas de la red eléctrica. Los más conocidos son: SMA, Xantrex, Steca, Outback y Morningstar.
- Batería: se puede considerar como el “Talón de Aquiles” en una instalación solar de mayor envergadura. Para este caso, se emplea un acumulador solar de GEL, similar al de los vehículos al no requerir mantenimiento. Para grandes instalaciones no resulta viable este tipo de baterías, con lo que se emplean los acumuladores estacionarios en vasos de 2 V. Para alcanzar la tensión y acumulación requerida por el sistema harían falta un buen número de vasos acumuladores, pues el precio para estos casos se dispara haciéndolo inviable. Estos requerimientos de acumulación pueden suponer más del 50 % del coste de la instalación.

Se puede nombrar como referencia a fabricantes como: Victron, Trojan, Hoppecke y Hawker.

- Convertidor AC-DC: es un dispositivo muy empleado para alimentar cargas en corriente continua. Los precios de estos dispositivos varían mucho dependiendo del fabricante. Conviene nombrar a Meanwell como



empresa fabricante taiwanés con una de las mejores relaciones calidad-precio.

- Estructura FV: se trata de la estructura que se encarga de soportar los módulos y otros elementos. Suelen ser de aluminio y simplemente comentar que se realizan a medida a la instalación. El precio de estas estructuras varían en función de la cantidad de material empleado. Destacan en el mercado: Hilti, Atersa, C-Solar y, como gran representante alemán se encuentra Schletter.

#### 5.4.2. Iluminación LED

El mercado de los dispositivos de iluminación LED tiene en la actualidad una competencia enorme ante la grandísima variedad de fabricantes del continente asiático. Esto ocurre sobre todo para los casos de iluminación de interiores, donde los dispositivos no están expuestos a las condiciones ambientales y los picos de la red, así como de tratarse de potencias más bajas.

Para la iluminación exterior, entran en consideración las empresas europeas. El fabricante de una luminaria exterior, como es el caso, está formado realmente por dos fabricantes: el fabricante del chip, esto, del dispositivo que emite la luz y la empresa ensambladora. Éstas últimas reciben los chips de los distintos fabricantes, lo integran de forma automatizada en una placa y se cierra en una carcasa si procede.



Figura 62 – Chip LED Cree y luminaria con los chips integrados en la placa

Los mejores chips proceden del mercado estadounidense, concretamente la marca Cree. Esta empresa goza de una posición dominante para estas aplicaciones exteriores. Finalmente, entre las más conocidas se pueden citar: Philips, GE, Schröder Socelec.

#### 5.4.3. Red sensorial

Se ha visto que un nodo sensorial está formado por varios módulos. El módulo principal sobre el que se desarrollan las actividades y funciones es el microcontrolador.

Existen diversas plataformas que estudian el desarrollo de la inteligencia de las motas. Tanto el *software* como el *hardware* deben ser configurables con cierta flexibilidad, lo que hace que cada una de estas plataformas apueste por sus sistemas. Los casos más significativos son:

#### 5.4.3.1 Crossbow

Crossbow es un fabricante de motas especializado que desarrolla plataformas hardware y software que da soluciones para las redes de sensores inalámbricas. Entre sus productos se encuentran las plataformas Mica, Mica2, MicaZ, Mica2dot, Telos y TelosB.

Las motas forman redes de tipo ad-hoc. Presentan características como la de permitir el descubrimiento de rutas, y que son auto-organizativas. Además, utiliza el sistema operativo TinyOS encargado de las comunicaciones radio y, de minimizar el consumo manteniendo la mayor parte del tiempo al sistema durmiendo, y sólo cuando ocurre un evento se despierta para atenderlo. Simplemente comentar que el lenguaje utilizado para programar las motas es el “NesC”, parecido a C.



Figura 63 – Nodo sensor MicaZ, de Crossbow

#### 5.4.3.2 Wasp mote

La plataforma Wasp mote fue lanzada por la empresa Libelium en el año 2009. El proyecto se centró en conseguir una plataforma de muy bajo consumo, alcanzando así los 0,7uA en modo hibernación. Hace uso de los módulos radio Xbee, lo que le permite trabajar a las frecuencias de 2,4GHz, 900Mhz y 868MHz (bandas ISM), y con los protocolos IEEE 802.15.4 y Zigbee.



Figura 64 – Wasp mote, de Libelium

Como se puede observar en la figura anterior, en el nodo Wasp mote se muestra el módulo de radio, entrada USB, tarjeta SIM, lector de tarjetas MMC/SD y el conector de expansión. Estos módulos están basados en una arquitectura modular por lo que es sencillo ampliar sus capacidades. Para ello se han desarrollado diferentes escudos o *shields* siendo algunos de los más utilizados los de GPS, GPRS, lectores de tarjetas SD, sensores para monitorización ambiental CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, presión atmosférica, de luminosidad, vibración, nivel de líquidos y módulos de entrada salida genéricos como ADC, entradas digitales, etc.

#### 5.4.3.3 iSENSE

iSENSE es una plataforma hardware y software para redes inalámbricas. Están constituidos principalmente con microcontroladores RISC de 32 bits y trabajan con la norma IEEE 802.15.4, pero, además, está disponible un protocolo propietario *mesh* o para redes en malla, que también incluye en capas superiores soporte para conexión a internet tanto en IPv4 como IPv6. Son programables a través del lenguaje C y, están fabricados por la empresa Coalsenses. Existe una variedad de módulos según su función como “Core Module 3”, o “Gateway Module” y distintos escudos o *shields* que los complementan.



Figura 65 – iSENSE, controlador de nivel de CO<sub>2</sub>, de Coalsenses



#### 5.4.3.4 Jennic

Jennic es una compañía de semiconductores líder en la revolución de la conectividad inalámbrica, proporcionando microcontroladores inalámbrica para una amplia gama de aplicaciones de la energía, el medio ambiente, seguimiento de activos y mercados de consumo.

Los productos de la compañía incluyen la más baja potencia de microcontroladores de última generación inalámbrica, módulos, plataformas de desarrollo, el protocolo y software de aplicación, con especial atención a IEEE802.15.4, ZigBee y normas 6LoWPAN.

Uno de los modelos más destacados de Jennic es el JN5121-xxx-M00, que es un módulo de montaje superficial que permite a los usuarios implementar sistemas de IEEE802.15.4 con el mínimo tiempo al mercado y al menor coste. Se elimina la necesidad de un desarrollo largo y costoso de las tarjetas de radiofrecuencia y suites de prueba. El módulo JN5121 utiliza un microcontrolador Jennic inalámbrico para proporcionar una solución completa, incluyendo todos los componentes de RF. Todo lo que se requiere para desarrollar y fabricar el control inalámbrico o productos de detección es conectar una fuente de alimentación y periféricos tales como interruptores, actuadores o sensores, lo que simplifica considerablemente el desarrollo de productos.



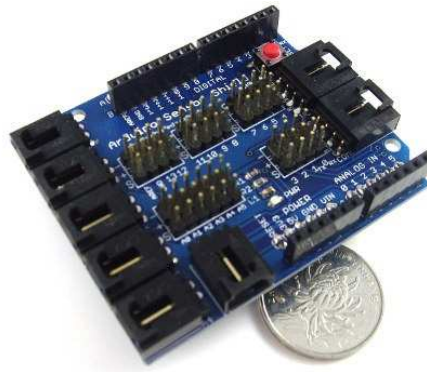
Figura 66 – Placa Jennic JN5121

#### 5.4.3.5 Arduino

Arduino es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. No es más que una placa con un circuito que comunica un procesador con diferentes puertos de entrada o salida, y con una memoria E2PROM. Esta memoria actúa a modo de pequeño disco duro, donde se almacenan los programas diseñados a ejecutar. Su unidad de procesamiento está basada en los microcontroladores Atmega168 ó Atmega8.

Arduino puede tomar información del entorno a través de transductores conectados a los múltiples pines de entrada y, operar como actuador mediante los interfaces de salida a los que se pueden conectar luces, motores, etc. Tanto el diseño de

la placa como el software de programación están disponibles bajo licencia abierta y cualquiera es libre de adaptarlo a sus necesidades.



**Figura 67 – Arduino Sensor Shield**

Al igual que Arduino, existen otras plataformas tanto de hardware como de software libre para la experimentación con microcontroladores. Destaca: Pingüino o Raspberry.

#### **5.4.3.6 Otras soluciones**

Como se ha visto, muchas de estas plataformas son de electrónica abierta con la idea de extender un modelo. En las páginas web de éstas, se puede obtener la información para programarlos y sus características técnicas y poder ver la compatibilidad con los periféricos.

Todo esto sucede desde un punto de vista de desarrollador o investigador, pero las compañías que comercializan este tipo de dispositivos los hacen sencillos para el usuario, donde solamente tiene que indicar las necesidades y ellos mismos se encargan de instalarlo. Además, estéticamente es como un teléfono m-ovil donde sólo se van los puertos donde se conecta cada periférico.

Se verán algunas empresas que comercializan estos productos:

- Grupo Telnet Redes Inteligentes: desarrollan placas de circuito impreso con la finalidad de dotar de inteligencia al mobiliario urbano o a espacios que requieran una monitorización.
- Advanced Wireless Dynamics: empresa que desarrolla sensores, actuadores y pasarelas.
- Cisco: empresa que dispone de los dispositivos que enrutan los paquetes a través de la red, como pasarelas, concentradores, etc.

## 5.5. Estudio económico

### 5.5.1. Presupuesto

Una que vez se tiene constancia de todos elementos que integran el sistema se puede elaborar una cotización de estos materiales basándonos en los precios del mercado:

Cotización de materiales					
1		Nodos sensores parking	Uds	Precio unit	Precio
	1.1	Placa microcontrolador Arduino	1200	18,95	22740
	1.2	Sensor magnético	1200	4,07	4884
	1.3	Mód. Comunicaiones Xbee ZB	1200	22,95	27540
	1.4	Batería de litio no recargable de 52 Ah	1200	72	86400
					141.564,00 €
2		Nodos sensores báculo			
	2.1	Placa microcontrolador Arduino	120	18,95	2274
	2.2	Sensor luminoso	120	1	120
	2.3	Mód. Comunicaiones Xbee ZB	120	22,95	2754
	2.4	Batería de litio recargable de 6600 mAh	120	37,6	4512
	2.5	Relé actuador en esado sólido	120	35,5	4260
	2.6	Cargador de batería conectado a Arduino	120	12,3	1476
					15.396,00 €
3		Sistema solar e Iluminación			
	3.1	Módulo FV 12 V / 137 W	240	68,5	16440
	3.2	Regulador de carga 12 V / 10A	120	39,95	4794
	3.3	Bateria 12 V / 260 Ah	120	238	28560
	3.4	Estructura	120	49,85	5982
	3.5	Convertor DC-AC	120	4,75	570
	3.6	Luminaria LED 106 W	120	275	33000
					89.346,00 €
4		Pasarela o Gateway			
	4.1	Pasarela	1	750	750
					750,00 €
		SUBTOTAL			247.056,00 €
		IVA	21%		51.881,76 €
		TOTAL			298.937,76 €



Según los costes de los distintos materiales indicados:

- El precio de cada nodo sensor de aparcamiento es de 117,97 € a lo que hay que sumar la carcasa PVC que se proponía para otorgar a la mota del grado de protección necesario. Se observa que la batería es el punto débil del sistema por su alto coste, ya que supone más del 60% del precio del nodo. Como propuesta adicional se puede sustituir por una batería de 26 Ah de capacidad, con lo que su duración sería de unos 5 años aproximadamente, pero el precio cae a la mitad.
- El precio de cada uno de los sensores que se sitúan en el báculo es de 128,30 €.
- Los componentes que forman parte de la instalación fotovoltaica suma 106.380,00 €. Esto es para la potencia instalada de 32.880 W.
- La pasarela presenta un precio de 750,00 € ya que se recomienda un dispositivo robusto.

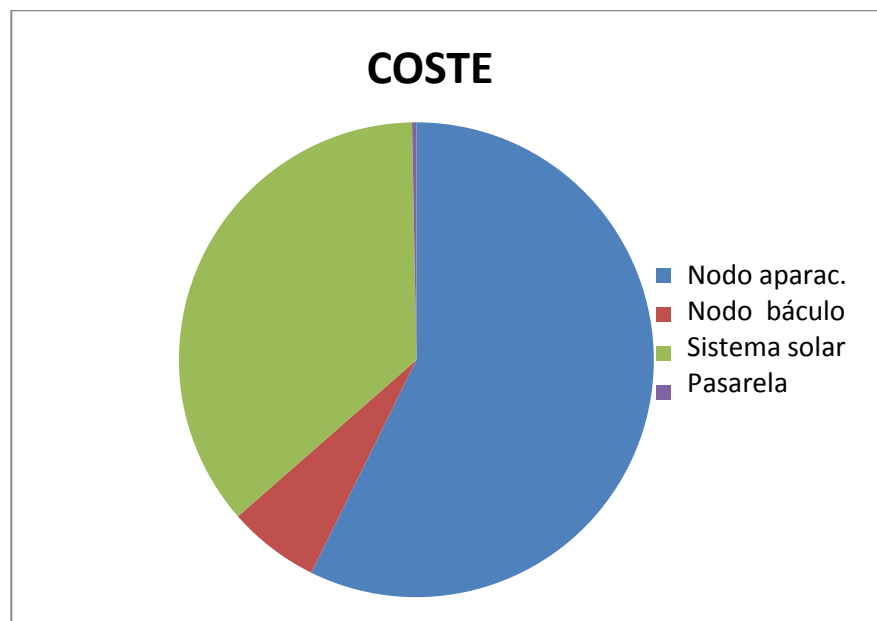


Figura 68 – Distribución de costes

### 5.5.2. Análisis de ahorro

La parte de la instalación de energía solar y las luminarias LED requieren una inversión de 89.346,00 €. Realizando un pequeño estudio comparativo con los parámetros de funcionamiento de las instalaciones según los requisitos comentados se verá el tiempo necesario para recuperar la inversión.

El ahorro en el consumo energético anual de todo el parque de farolas viene dado por la diferencia entre el consumo de las luminarias actuales de VSAP de 171 W y las luminarias LED de 106 W con sistema de alimentación solar.

Se obtienen, por tanto, los siguientes resultados:

		INSTALACIÓN ACTUAL	INSTALACIÓN PROPUESTA LED
<b>SISTEMA DE MEJORA DE ALUMBRADO EXTERIOR (120 unidades)</b>			
Nº LÁMPARAS	UND	120	120
POTENCIA UNIT.	W	171	106
CONSUMO MENSUAL	KW/h	6.771,60	334,58
CONSUMO ANUAL	KW/h	82.388	5.340
COSTE MENSUAL	EUROS	1.015,74 €	66,75 €
COSTE ANUAL	EUROS	12.358,17 €	801,00 €
<b>AHORRO MENSUAL ELECTRICIDAD</b>		<b>6.437,02 KW/h</b>	
<b>AHORRO ANUAL ELECTRICIDAD</b>		<b>77.048 KW/h</b>	
<b>AHORRO MENSUAL POR CONSUMO</b>		<b>948,99</b>	<b>EUROS</b>
<b>AHORRO ANUAL POR CONSUMO</b>		<b>11.557,17</b>	<b>EUROS</b>
<b>INVERSIÓN POR CAMBIO DE LUMINARIA</b>		<b>89.346,00</b>	<b>EUROS</b>
<b>AHORRO ANUAL TOTAL POR EMPLEO DE LED</b>		<b>12.119,27</b>	<b>EUROS</b>
<b>TIEMPO DE RETORNO DE LA INVERSIÓN</b>		<b>7,37</b>	<b>AÑOS</b>

Figura 69 – Parámetros de la inversión

Como se puede observar, la inversión se recupera hacia el séptimo año, de forma que se puede considerar una cifra buena teniendo en cuenta el tiempo de explotación del centro comercial.



## 6. CONCLUSIONES

---

Para finalizar este trabajo, se comentarán los aspectos más importantes que se han podido extraer.

Pues bien, se ha visto cómo ha ido evolucionando las instalaciones de alumbrado público en cuanto a iluminación se refiere. Se comenzaron empleando bombillas donde era necesario una persona para encenderlas hasta los modelos actuales, los cuales compiten en durabilidad, calidad de reproducción cromática, eficiencia luminosa, consumo, mantenimiento, flujo luminoso, etc. Se va visto que la tecnología LED se está imponiendo en el mercado de alumbrado exterior gracias a las múltiples ventajas sobre el VSAP y VMAP.

Por tanto, para disponer en el mercado de una farola eficiente se ha diseñado un modelo que incluye la tecnología LED como fuente luminosa. Estudiando las necesidades de la instalación en cuestión, se llevaron a cabo los estudios y cálculos de una instalación solar para generar electricidad que luego sería empleada por la luminaria. Se ha visto que es un sistema totalmente compatible y eficiente. En esta instalación, se ha mantenido el punto de conexión a la red para casos meteorológicos extremos donde no haya energía que ofrecer a la luminaria y poder emplear ésta. Conviene destacar, que en la instalación solar las baterías constituyen un porcentaje muy elevado del precio de la instalación.

Por otro lado, se ha realizado un estudio del funcionamiento de las WSN analizando los distintos protocolos que pueden emplearse. Para implementar una WSN, el protocolo Zigbee, basado en el estándar IEEE 802.15.4, es muy versátil ya que permite desplegar has 65.535 nodos. Con ellos, se pueden ordenar topologías que permiten ampliar la cobertura de la red, establecen una transmisión de información fiable, los nodos tienen consumos muy bajos y tamaños pequeños, es un sistema escalable, lo cual puede adaptarse a cambios de escenario.

Empleando una WSN de estas características, se han otorgado a las farolas de un funcionalidad adicional: la de encaminar la información proveniente de otros nodos que indican el estado de una plaza de aparcamiento y la de actuar sobre el encendido y apagado de las luminarias en función de las condiciones de iluminación del entorno. Asimismo, se puede actuar sobre las farolas remotamente o programar el horario de encendidos y apagados. Incluye la posibilidad de regular el nivel de intensidad para situaciones donde no se requiere que la luminaria brille al 100 %.

La instalación solar fotovoltaica también está conectada con el nodo situado sobre ella y puede recargar la batería. Esto es realmente un ventaja ya que se pueden emplear baterías de capacidades pequeñas, las cuales resultan más baratas que las no recargables.



## 6.1. Líneas futuras

Ante la situación tecnológica actual, una mejora del sistema diseñado se puede conseguir basándose en la conexión de un periférico GPS al nodo situado en la plaza de aparcamiento (detecta el estado de la plaza gracias a un sensor magnético), el cual transmite su posición y puede ser detectado por el vehículo.

Por su parte, comentar que las instalaciones solares en sistemas con baterías requieren una inversión que puede llegar a ser casi del doble que para el caso de estar conectados a la red. Por tanto, una reducción del precio de este componente, otorgaría de mayor viabilidad a estas instalaciones. Finalmente, la tecnología LED avanza a pasos grandes, de forma poco a poco se consiguen modelos que ocupan menos espacio y producen más lúmenes por vatio.





## 7. BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Historia del alumbrado público, <http://es.wikipedia.org/>
- [2] LED, <http://www.pro-ee.eu/>
- [3] Historia alumbrado público, <http://www.luxtronic.com.mx>
- [4] Eficiencia energética en alumbrado público, <http://www.idae.es/>
- [5] Sistemas de iluminación, <http://www.ceisp.com/>
- [6] Revista de iluminación, <http://www.iluminet.com/>
- [7] "Iluminación con tecnología LED", Alfonso Gago, Jose Fraile.
- [8] "Las Energías renovables", Mario Ortega Rodríguez
- [9] Artículo "BP Statistical Review of World Energy 2010"
- [10] Artículo "Renewables Global Status Report 2011"
- [11] "Energía Solar Fotovoltaica", Javier María Méndez Muñiz, Rafael Cuervo García.
- [12] Conocimiento Smart City, <http://www.smartcityexpo.com/>
- [13] Escenario Smart City, <http://www.smartcities.es/>
- [14] Informe Smart City, <http://smartcity-telefonica.com/>
- [15] "Redes inalámbricas de sensores: Una nueva arquitectura eficiente y robusta basada en jerarquía dinámica de grupos", Juan Vicente Capella Hernández.
- [16] Tendencias Wireless Sensor Networks,  
<http://www.coit.es/publicaciones/bit/bit165/61-64.pdf>
- [17] "Estudio de las redes sensoriales como una nueva alternativa de comunicación inalámbrica", Edgar Javier Cobos Hernández.
- [18] "Wireless sensor and actuator networks", R. Verdone, D. Dardari, G. Mazzini and A. Conti
- [19] "802.15.4 vs ZigBee", David Gascón, Wireless Sensor Networks Research Group
- [20] Estándar 802.15.1, Bluetooth, <http://www.ieee802.org/15/pub/TG1.html>
- [21] Estándar 802.11, Wi-Fi, <http://ieee802.org/11/>
- [22] Estándar 802.15.3, <http://www.ieee802.org/15/pub/TG3a.html>



[23] Página oficial de Z-Wave Alliance, <http://www.z-wavealliance.org>

[24] Estándar 802.15.4, <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>

[25] Página oficial de Zigbee Alliance, <http://www.zigbee.org/>

[26] Digi International, <http://www.digi.com/>

[27] Crossbow, <http://www.xbow.com/>

[28] Wasmote, <http://www.libelium.com/products/wasmote>

[29] Placas Arduino, <http://arduino.cc/es/Main/Hardware>



